

Le plus célèbre astrophysicien anglais évalue à 50 % les chances de survie de l'humanité à l'issue du XXI^e siècle.

Aussi grisantes soient-elles, les avancées scientifiques et technologiques sont aléatoires, créant chaque jour de nouveaux dangers : pollution galopante, virus inédits, cyberterrorisme, expériences hasardeuses... Toutes ces menaces sont, à l'heure actuelle, bien plus inquiétantes que celles d'un conflit nucléaire subies depuis la guerre froide. Quant à l'environnement, les traitements que nous lui infligeons auront des retombées autrement plus graves que celles des catastrophes naturelles (séismes, éruptions volcaniques, etc.).

Le progrès n'a jamais autant qu'aujourd'hui fragilisé le monde : comment concilier alors l'extension de nos libertés et la protection de l'avenir ?

Astrophysicien passionné de l'univers contemporain et grand humaniste, Martin Rees nous met en garde : non seulement l'humanité risque de s'autodétruire, mais elle pourrait même entraîner dans sa chute le cosmos tout entier... Dans ce livre à la fois profond et accessible, il nous expose en termes clairs ses doutes et ses inquiétudes : l'humanité survivra-t-elle à notre siècle ?

Membre de la Royal Society et enseignant à Cambridge (King's College), Martin Rees est également l'astronome officiel de la cour d'Angleterre et l'auteur de nombreux ouvrages.

MARTIN REES

Notre dernier SIÈCLE ?

*Avant-propos de
Hubert Reeves*

17 € prix valable France



9 782709 623100

04.02.45.3247.9
ISBN : 2-7096-2310-2

Maquette : Atelier Didier Thimonier

JC Lattès

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Martin Rees

NOTRE DERNIER SIÈCLE ?

Avant-Propos de Hubert Reeves

*Traduit de l'anglais (Grande-Bretagne)
par Christine Godbille-Lambert*

Titre de l'édition originale
Our Final Hour
publiée par Basic Books, Perseus Books

Avant-propos

Martin Rees est une des grandes figures de la cosmologie contemporaine. Depuis plusieurs décennies, ses contributions à l'étude de nombreux sujets astrophysiques – tels que l'évolution du cosmos depuis ses premiers temps ou la présence des trous noirs au centre des galaxies actives – sont pratiquement devenues des chapitres de l'astronomie moderne. De nombreux exemples illustrent la pertinence de ses intuitions.

Dans ce livre, il dresse un bilan des menaces qui pèsent aujourd'hui sur l'espèce humaine. Il concentre en particulier son attention sur les dangers provoqués par l'humanité elle-même dans ses développements technologiques et industriels, et plus spécifiquement dans l'exploration potentielle de nos avancées en génétique moléculaire, en informatique et en robotique.

Avec la modestie qui le caractérise, Rees n'impose pas ses réflexions, il les présente d'une façon scientifique et pédagogique, laissant à chacun le soin d'en tirer les conclusions.

Pourtant on sent percer, au travers de ses mots,

L'inquiétude qui est la sienne face à l'assombrissement de notre avenir à si brève échéance. On peut espérer que son travail aura un impact profond qui atteindra les décideurs. A ce titre, ce livre est beaucoup plus qu'un simple livre scientifique, il participe de ce vaste mouvement qui, aujourd'hui, tente de sauver l'humanité tant (du moins l'espérons-nous !) qu'il est encore temps.

Hubert Reeves.

Préface

La science n'a jamais progressé aussi vite ni son champ été aussi vaste : biotechnologie, cybertechnologie, nanotechnologie, exploration de l'espace... Mais, pour grisants que soient les horizons qu'elle nous ouvre, ceux-ci ne vont pas sans risques. Les sciences nouvelles peuvent en effet engendrer des conséquences incalculables en ceci qu'elles donnent aux humains les moyens de perpétrer des actes terrifiants, ou de commettre des erreurs apparemment anodines aux retombées dévastatrices. Cet aspect critique de la technologie du XXI^e siècle pourrait s'avérer plus inquiétant, parce que moins maîtrisable, que le risque de catastrophe nucléaire auquel nous sommes confrontés depuis des dizaines d'années. Nos activités pèsent en outre sur l'environnement au point que celui-ci est davantage menacé par nous aujourd'hui qu'il ne l'a été pendant des millénaires par les désastres naturels tels que séismes, éruptions volcaniques ou impacts d'astéroïdes.

Bien que concis, le présent ouvrage aborde de nombreux thèmes, traités par chapitres pouvant être lus

séparément. Il y est question de la course aux armements, des nouvelles technologies, des crises liées à l'environnement, des perspectives et des limites des découvertes scientifiques, et de l'avenir de la vie sur Terre. Certains des nombreux spécialistes avec lesquels j'ai eu le plaisir de discuter découvriront que mes prises de position diffèrent des leurs ; mais n'en va-t-il pas de ces thèmes controversés comme de tous les « scénarios » du futur à long terme ?

J'espère au moins stimuler le débat sur les moyens de nous prémunir contre les pires dangers tout en faisant progresser les connaissances pour le bien de l'humanité. Savants et technologues ont des obligations spécifiques mais, dans un monde interconnecté, il nous incombe aujourd'hui à tous d'attirer l'attention des pouvoirs publics sur les régions du monde les moins privilégiées et les plus vulnérables.

Mes remerciements vont à John Brockman qui m'a encouragé à écrire ce livre. Je lui suis reconnaissant, ainsi qu'à Elizabeth Maguire, pour leur infinie patience, tout comme à Christine Marra et à son équipe, dont l'efficacité et le dynamisme ont permis à cet ouvrage de voir le jour.

1.

Prologue

Le ^{xx}e siècle nous ayant apporté la bombe, la menace nucléaire pèse à jamais sur nous, les risques à court terme liés au terrorisme sont une des préoccupations majeures des populations et des responsables politiques, et les inégalités de richesse et de bien-être ne cessent de croître... Ces thèmes mobilisateurs sont déjà amplement traités, et mon intention n'est pas de m'y appesantir mais d'insister sur les aléas du ^{xxi}e siècle auxquels on pense moins, menaces pour l'humanité, et plus encore pour son environnement.

Certains de ces nouveaux dangers se font déjà jour, d'autres ne sont encore que des conjectures : l'air contaminé par des virus mortels « artificiels » pourrait rayer certains peuples de la carte ; des techniques nouvelles bien plus ciblées et plus efficaces que nos panacées et nos drogues peuvent transformer la nature humaine, et peut-être serons-nous un jour menacés par des ordinateurs hyper intelligents ou des nanomachines mal

intentionnées, dotés de la capacité de se reproduire à une échelle effroyable.

D'autres risques inédits ne sont pas totalement à exclure. Les expériences provoquant la collision de particules au moyen d'énergies considérables pourraient déclencher une réaction en chaîne qui endommagerait tout sur terre et déchirerait jusqu'à la matière de l'espace lui-même – événement « infernal » sans appel, dont les retombées se propageraient à la vitesse de la lumière et engloutiraient l'univers tout entier. Ce type de scénario est peut-être tout à fait improbable, mais il soulève de façon aiguë la question de savoir qui, et de quelle façon, doit prendre la décision d'autoriser ces essais ; car ces derniers, à réelle visée scientifique et offrant vraisemblablement des avantages pratiques, présentent néanmoins le risque de conséquences funestes.

Comme nos générations d'ancêtres, nous vivons sous la menace de désastres susceptibles de provoquer un cataclysme planétaire : éruptions volcaniques majeures et impacts d'astéroïdes géants, par exemple. Les catastrophes naturelles de cette ampleur sont heureusement si rares – et donc si peu susceptibles d'advenir de notre vivant – que nous n'y pensons pas et qu'elles n'empêchent quasiment personne de dormir. Mais s'y ajoutent aujourd'hui d'autres risques environnementaux, dont, cette fois, nous sommes responsables et que nous ne pouvons écarter.

Pendant les années de guerre froide, la menace principale qui pesait sur le monde était celle d'un conflit thermonucléaire généralisé dû à l'escalade de la lutte entre deux super puissances. Nous y avons apparemment échappé mais, pour nombre d'experts – dont certains responsables politiques de l'époque –, nous avons eu de

la chance ; selon d'autres, le risque cumulé de catastrophe au cours de cette période était d'au moins cinquante pour cent. Si le danger immédiat d'un conflit atomique mondial s'est éloigné, l'utilisation à plus ou moins long terme de l'arme atomique dans telle ou telle région du monde demeure une menace croissante.

Car si les armes nucléaires peuvent être démantelées, on ne peut pas les dés-inventer : la menace existe à jamais et pourrait refaire surface au cours de ce siècle ; on peut en effet imaginer un réalignement donnant lieu à des prises de positions aussi dangereuses qu'au temps de la guerre froide et un déploiement d'arsenaux encore plus important qu'alors. En outre, une menace peut sembler négligeable d'une année sur l'autre mais devenir plausible si elle perdure sur des décennies. Et au risque de conflit nucléaire viendront s'ajouter d'autres, tout aussi dévastateurs et beaucoup moins maîtrisables. Ces derniers pourraient bien ne pas être déclenchés par des gouvernements, ni même par des « Etats voyous », mais par des individus ou des groupuscules ayant accès à une technologie de plus en plus sophistiquée, et les moyens qu'ils auront de provoquer une catastrophe sont malheureusement nombreux.

Le principe dissuasif conçu par les stratèges de l'ère atomique est fondé sur la « destruction mutuelle assurée », dont le sigle anglo-saxon MAD (« mutually assured destruction ») est singulièrement approprié. Pour vérifier cette doctrine, des docteurs Folamour en chair et en os¹ ont imaginé une hypothétique « machine infernale », arme dissuasive de dernier recours, trop diabolique pour être utilisée par un responsable politique doté de raison. Mais au cours du XXI^e siècle, des savants seront peut-être en mesure de mettre au point une véritable

machine infernale non nucléaire, et il n'est pas inconcevable que des citoyens lambda parviennent à maîtriser ce moyen potentiel de destruction, alors qu'au siècle précédent, cette prérogative effrayante était celle d'un petit nombre d'hommes au pouvoir dans les pays dotés de l'arme atomique. Si quelques milliers d'individus avaient le doigt sur le bouton d'une machine infernale, l'acte fou ou même l'erreur d'un seul d'entre eux pourrait entraîner notre fin à tous.

Le péril suggéré par ce type de scénarios de l'extrême est peut-être moins irréalisable, tout comme l'édification d'un château de cartes, en théorie faisable. Mais bien avant que de simples citoyens acquièrent les moyens de l'apocalypse – ce qui pourrait se faire d'ici une dizaine d'années –, certains pourront aussi déclencher des événements de même ampleur que les effroyables attentats terroristes que nous connaissons aujourd'hui. Pour ce faire, nul besoin d'un réseau organisé comme Al Quaida : il suffirait d'un fanatique ou d'un marginal animé des mêmes intentions que celles des concepteurs de virus informatiques. De tels individus existent dans tous les pays ; ils sont certes peu nombreux, mais les biotechnologies et cybertechniques seront si performantes que l'acte d'un seul d'entre eux pourrait bien suffire.

D'ici 2050, peut-être les sociétés et les nations se seront-elles radicalement réalignées, nos façons de vivre auront-elles complètement changé, notre espérance de vie augmenté et nos comportements (modifiés par la médecine, l'implantation de puces électroniques, etc.) seront-ils très différents. Mais subsisteront la faillibilité de l'être humain et le risque d'actes malveillants de marginaux aigris et de groupes dissidents. Des avancées

technologiques naîtront de nouveaux moyens générateurs de terreur et de destruction, et la communication instantanée d'un point à l'autre du globe amplifiera leur impact social. Encore plus inquiétant, des catastrophes pourraient advenir du simple fait d'avatars technologiques, des accidents graves (création ou fuite involontaire d'un agent pathogène nocif à propagation rapide, ou problème majeur de logiciel, par exemple) pouvant se produire au sein même d'organismes bien réglementés. Plus les menaces s'aggraveront et leurs possibles responsables se feront nombreux, plus les conséquences seront délétères pour la société, qui régressera. A long terme, ce risque peut affecter l'humanité elle-même.

Loin d'être proche de sa fin comme le prétendent certains, la science progresse à un rythme accéléré. Les prochaines découvertes qui perceront les mystères face auxquels nous sommes aujourd'hui perplexes (structures de la réalité physique, complexité de la vie, du cerveau et du cosmos) engendreront des applications mineures, mais elles poseront de nouveaux problèmes d'éthique et feront naître de nouveaux dangers. Comment ferons-nous la part des multiples possibilités offertes par la génétique, la robotique ou la nanotechnologie et celle des risques – même mineurs – de catastrophe planétaire ?

Ma spécialité de scientifique est la cosmologie, c'est-à-dire l'exploration de notre environnement sous tous ses aspects. Ceci peut sembler un moyen éloigné des problèmes pratiques de la Terre – Gregory Bendford, astrophysicien et auteur d'ouvrages de fiction, n'affirme-t-il pas que l'étude « de la grande giration des mondes persuade les astronomes de notre extrême finitude et les induit peut-être en erreur »² ? Peu nombreux sont cependant les savants assez naïfs pour être concernés par cette

réflexion : l'astrophysicien qui s'interroge sur les espaces presque infinis ne devient certes pas très « philosophe » face au quotidien, mais il n'en est pas moins conscient des problèmes qui se posent et se poseront à nous ici, sur la Terre. Ma démarche personnelle est plus proche de ce qu'exprime mon collègue de Cambridge, le mathématicien et philosophe Frank Ramsey : « Je ne me sens absolument pas humble face à l'immensité de l'espace. Aussi vastes que soient les étoiles, elles ne peuvent ni penser ni aimer, ce qui est à mes yeux bien plus impressionnant que la taille... Ma représentation du monde est une vue en perspective, pas un dessin à échelle réduite. Ce sont les êtres humains qui en constituent la toile de fond, et toutes les étoiles y sont minuscules³. »

De fait, cette perspective cosmique renforce les préoccupations des astrophysiciens quant à ce qui se passe ici et maintenant, car elle donne une idée du prodigieux potentiel de la vie. Notre biosphère a mis plus de quatre milliards d'années à se constituer au cours de plusieurs phases de sélection darwinienne infiniment longues, et ce passé immémorial fait désormais partie de notre patrimoine. Mais l'avenir pourrait durer encore plus longtemps, et au cours de cette éternité à venir, la diversité de la vie sur terre et ailleurs pourrait s'avérer encore plus étonnante. L'évolution de l'intelligence et de la complexité du vivant pourrait bien n'en être qu'à ses débuts cosmiques.

On se souvient d'une des premières photos prises de l'espace : un « lever de Terre » vu de l'engin spatial en orbite autour de la Lune. Notre habitat de terres, d'océans et de nuages y revêt un délicat aspect transparent, dont la fragile beauté contraste avec la désolation et la sécheresse du paysage lunaire sur lequel les

astronautes ont laissé l'empreinte de leurs pas. Ces vues à distance du globe terrestre, nous ne les possédons que depuis une quarantaine d'années ; or, notre planète existe depuis plus de cent millions de fois plus longtemps : quelles transformations a-t-elle subies pendant tout ce temps ?

Il y a environ quatre milliards et demi d'années⁴, le Soleil s'est formé à partir de la condensation d'un nuage cosmique et a été encerclé par un anneau de gaz tourbillonnant ; la poussière s'y est agglomérée en un fourmillement de roches tournant en orbite, qui se sont ensuite fondues ensemble pour former les planètes. L'une d'elles est devenue la Terre – « le troisième rocher à partir du Soleil ». La jeune Terre a été secouée par des chocs avec d'autres corps, dont certains étaient aussi gros que les planètes elles-mêmes ; un de ces impacts a creusé assez de roches en fusion pour former la Lune. Les choses se sont calmées et la Terre s'est refroidie. Les transformations suivantes, assez distinctes pour être visibles par un observateur lointain, sont advenues très progressivement. Pendant plus d'un milliard d'années, l'oxygène s'est accumulé dans l'atmosphère terrestre grâce à la première vie unicellulaire. Les changements survenus par la suite dans la biosphère – formation de masses de terre et dérive des continents – ont été plus lents. La calotte glaciaire a fondu et diminué ; il se peut même qu'il y ait eu des phases de gel au cours desquelles la Terre entière a pris un aspect blanc plutôt que bleu pâle.

Les seuls bouleversements violents ont été provoqués par d'importants impacts d'astéroïdes ou des éruptions volcaniques majeures. Lors de ces événements exceptionnels, les projections de roches détritiques dans la stratosphère ont dû être telles que pendant plusieurs

années, et jusqu'à ce que toute la poussière et les gaz émis se fixent, la Terre a eu un aspect gris foncé et non blanc bleuté, et la lumière solaire n'est pas parvenue jusqu'aux terres ni aux océans. En dehors de ces chocs brefs, rien n'est advenu brusquement : des espèces nouvelles ont surgi les unes après les autres, ont évolué puis se sont éteintes au cours de phases de l'ordre de millions d'années.

C'est lors d'un laps de temps minuscule – la dernière millionième phase de l'histoire terrestre, c'est-à-dire quelques centaines d'années – que les formes de végétation ont changé bien plus rapidement qu'avant. Ce phénomène est à l'origine de l'agriculture, qui est l'empreinte sur le sol d'un peuplement humain possédant des outils. La population humaine s'est intensifiée et a ainsi accéléré le rythme de l'évolution. Mais par la suite, des changements bien différents sont advenus, encore plus soudains. En cinquante ans le volume de dioxyde de carbone de l'atmosphère qui, au cours de presque toute l'histoire de celle-ci avait lentement diminué, a commencé à augmenter à une vitesse anormalement élevée. La planète s'est mise à émettre des ondes radio (produites par l'ensemble des émissions de télévision, des téléphones mobiles et des radars) à un rythme intensif.

Un autre phénomène s'est également produit, inédit au cours des quatre milliards et demi d'années de vie de notre planète : des objets métalliques – certes tout petits, pesant au plus quelques tonnes chacun – ont quitté la surface terrestre et ont complètement disparu de la biosphère. Certains sont devenus des orbites tournant autour de la Terre ; d'autres ont atterri sur la Lune et les planètes, d'autres encore ont même suivi une trajectoire qui

les a menés jusque dans les profondeurs de l'espace interstellaire et ils ont à jamais quitté le système solaire.

Si des extraterrestres pourvus de connaissances scientifiques avancées observaient notre système solaire, ils pourraient en toute confiance prédire à notre planète une catastrophe dans six milliards d'années : proche de sa fin, le Soleil enflera jusqu'à devenir un « géant rouge » et soufflera tout de la surface terrestre. La Terre étant à peine à mi-parcours de sa vie, on ne devrait logiquement pas être en mesure aujourd'hui de prévoir ce bouleversement sans précédent. Mais tous ces phénomènes d'origine humaine adviennent si vite qu'il est déjà possible d'en parler...

De quoi pourraient être témoins ces hypothétiques étrangers dans les cent prochaines années s'ils poursuivaient leur observation ? Y aura-t-il un dernier grondement suivi de silence ? La planète elle-même se stabilisera-t-elle ? Quelque part dans le système solaire, de nouvelles oasis de vie naîtront-elles d'un de ces petits objets métalliques provenant de la Terre, et s'étendront-elles très au-delà du système solaire grâce à une forme de vie différente, à des machines étranges ou à des signaux complexes, créant ainsi une « sphère verte » qui finira par recouvrir la galaxie tout entière ?

Affirmer que l'espace-temps crucial – mis à part le Big-Bang – se situe ici et maintenant n'est peut-être pas déraisonnable. Je pense en effet que les chances de survie des humains sur la Terre d'ici la fin du siècle ne dépassent pas cinquante pour cent. Seuls nos choix et nos comportements permettront d'assurer la pérennité de la vie future sur la Terre et peut-être au-delà ou, au contraire, menaceront le potentiel de vie puis provoqueront la fin de l'avenir humain et post-humain. Ce qui

va donc se passer ici, sur la Terre, au cours du siècle, pourrait faire toute la différence entre deux quasi-éternités : l'une, riche de formes de vie toujours plus complexes, et l'autre seulement constituée de matière.

2.

Le choc technologique

La science du xx^e siècle peut non seulement transformer la façon de vivre des humains mais les humains eux-mêmes, et rien ne dit qu'une machine hyper intelligente ne sera pas notre toute dernière invention.

« Les bouleversements advenus au cours du siècle dernier ont été plus nombreux que lors du précédent, et ils sembleront minimes comparés à ceux que nous verrons au cours du siècle présent. » Tel était le sentiment souvent exprimé en 2000 et 2001, à l'aube du nouveau millénaire ; or, ces paroles, prononcées il y a plus de cent ans, s'appliquaient respectivement aux xix^e et xx^e siècles : il s'agit d'un extrait de la conférence intitulée *Découverte du futur*¹, donnée en 1902 par le jeune H.G. Wells à la Royal Institution de Londres.

A la fin du xix^e siècle, les grandes lignes de

l'évolution de la Terre et de sa biosphère étaient déjà connues grâce à Darwin et aux géologues ; on ignorait encore l'âge précis de notre planète mais on l'estimait à des centaines de millions d'années. Wells lui-même était au courant de ces données, novatrices et scandaleuses pour l'époque, qu'il avait acquises de T.H. Huxley, défenseur convaincu et ardent promoteur de Darwin.

« L'humanité a beaucoup progressé, dit Wells lors de cette conférence visionnaire, et la distance parcourue nous donne une assez bonne idée du chemin qui nous reste à faire. Tout le passé n'est que le commencement du commencement ; tout ce que l'esprit humain a accompli n'est que le rêve qui précède le réveil. » Ces paroles non dénuées de courage résonnent encore cent ans plus tard, et Wells avait vu juste : le ^{XX}^e siècle a connu davantage de bouleversements que les cent ans précédents réunis, et nos connaissances – sur l'atome, la vie et le cosmos – se sont amplifiées à un rythme que pas même lui ne pouvait imaginer. Les retombées de nouvelles découvertes ont transformé nos existences, et les incroyables innovations techniques, comme les perspectives des prochaines décennies, n'auraient pas manqué de l'enthousiasmer.

Mais l'optimisme de Wells ne faisait pas de lui un naïf et, dans son exposé, il insistait sur le risque de catastrophe planétaire : « Comment montrer que certaines choses peuvent détruire à jamais l'humanité et mettre fin à son histoire ? Que la mort peut du jour au lendemain fondre sur nous et réduire à néant tous nos rêves, tous nos efforts ? ... ce pourrait être le fait d'un objet venu de l'espace, d'une peste, de quelque grave dysfonctionnement atmosphérique, d'une trace de poison laissée par une comète, d'une puissante émanation de

vapeur de l'intérieur de la Terre, de nouveaux animaux prédateurs, ou encore d'une drogue, ou d'une folie humaine destructrice. » Wells, dont le pessimisme alla grandissant à la fin de sa vie et culmina dans son dernier ouvrage, *The Mind at the End of its Tether*, frôlait le désespoir quant à la « face sombre » de la science, et il serait peut-être horrifié s'il vivait encore aujourd'hui. Car, ayant déjà les moyens de nous détruire par la guerre atomique, nous sommes, à l'aube de ce siècle, en train d'acquérir le savoir-faire biologique susceptible de nous être non moins fatal ; intégrée, notre société va devenir plus vulnérable aux cyber risques, et nos activités pèsent de plus en plus dangereusement sur l'environnement. Les tensions exacerbées entre les retombées inoffensives de nos découvertes et leurs conséquences nuisibles sont une réalité préoccupante, tout comme les risques inhérents au pouvoir prométhéen que nous offre la science.

Comme ne pouvait l'ignorer son auditoire, Wells était aussi l'auteur de *La machine à explorer le temps*. Dans ce roman devenu un classique, « l'Explorateur du Temps » abaisse doucement le levier de sa machine : « La nuit vint comme on éteint une lampe ; et un moment après, demain était là. » Il accélère et « la palpitation du jour et de la nuit se fondit en une teinte grise continue... Je continuai mon voyage, m'arrêtant de temps à autre, par enjambées de milliers d'années ou plus, entraîné par le mystère du destin de la terre, guettant avec une étrange fascination le soleil toujours plus large et plus morne dans le ciel d'occident, et la vie de la vieille terre dans son déclin graduel. » Il parvient à une époque où l'humanité s'est divisée en deux sous-espèces : les veules et infantiles Eloïs, et les Morlocks, des brutes souterraines qui les exploitent. Trente millions d'années plus tard, il

arrive dans un monde où toutes les formes de vie connues ont disparu. Il rentre alors dans le présent, chargé d'étranges plantes qu'il a rapportées et qui témoignent de son périple.

Dans ce récit, la séparation des humains en deux espèces a pris huit cent mille ans, période qui correspond à l'idée que l'on se fait du temps que l'humanité a mis à émerger grâce à la sélection naturelle. (Les traces de nos ancêtres hominoïdes datent de quatre millions d'années et l'homme « moderne » a succédé au néandertalien il y a environ quarante mille ans.) Mais au cours de ce siècle, les manipulations génétiques et biotechnologiques devenues courantes pourraient accélérer le rythme des mutations physiques et mentales des humains, qui n'aurait alors plus rien à voir avec celui de la sélection darwinienne ou même de l'élevage à base de sélection. Dans *Remaking Eden*², Lee Silver conjecture même qu'il suffirait peut-être de quelques générations pour que l'humanité se divise en deux espèces : si la technologie qui permet aux parents de « faire » génétiquement des enfants avantagés n'était disponible qu'aux gens aisés, le fossé entre les « génétiquement nantis » et les « autres » ne cesserait de se creuser. Quant aux mutations non génétiques, elles pourraient être encore plus rapides et transformer la mentalité humaine en moins d'une génération : le temps de fabriquer de nouvelles drogues et de les mettre sur le marché. Ainsi suffira-t-il peut-être d'un siècle pour que les caractéristiques fondamentales de l'humanité commencent à se modifier, alors qu'elles n'avaient quasiment pas bougé au cours des millions d'années de son histoire connue.

Echecs des prévisions

J'ai récemment trouvé chez un bouquiniste des magazines scientifiques datant des années 1920, illustrés de « dessins du futur » très inventifs : les avions de l'avenir y sont affublés de rangées d'ailes posées les unes sur les autres ; le dessinateur était parti du principe que, les biplans de l'époque ayant apparemment évolué par rapport aux monoplans, il était encore plus « évolué » de leur coller des ailes de type volet vénitien : l'extrapolation peut induire en erreur. Ainsi, en effectuant des projections de tendances existantes passe-t-on à côté des innovations les plus révolutionnaires, c'est-à-dire de ce qui est qualitativement nouveau et change véritablement le monde.

Francis Bacon faisait déjà remarquer il y a quatre cents ans que les progrès les plus importants sont les moins prévisibles. Trois découvertes passées le fascinaient en particulier : la poudre à fusil, la soie et la boussole. « Ces objets ..., écrit-il dans *Novum Organum*, ne furent pas découverts par les philosophes ou les sciences de la raison, mais par le hasard et l'opportunité. » Ce sont « des inventions proprement dites », donc « aucune notion préconçue ne peut avoir conduit à leur découverte ». Bacon était convaincu que « beaucoup de choses extrêmement utiles sont encore cachées dans la nature, elles n'ont absolument rien en commun avec ce qui a déjà été découvert... elles sont très loin des allées de l'imagination ».

Les rayons X, découverts en 1895, doivent avoir semblé aussi magiques à Wells que la boussole à Bacon. Bien que leur utilité soit manifeste, leur découverte ne peut avoir été programmée, car proposer de chercher un

moyen de voir le corps par transparence ne rimait à rien, et à supposer que cette démarche ait été fondée, la recherche entreprise n'aurait sûrement pas conduit au rayon X. Les grandes découvertes ne cessent de nous surprendre, et peu nombreux furent ceux capables de prévoir les inventions qui ont bouleversé le monde dans la deuxième moitié du ^{xx}e siècle. En 1937, la NASA entreprit une étude³ destinée à prédire les avancées scientifiques, dont les prévisionnistes technologiques d'aujourd'hui seraient bien avisés de lire les conclusions. On y trouve quelques prédictions sensées sur l'agriculture, le pétrole et le caoutchouc synthétiques, mais le plus remarquable, c'est ce dont il n'est pas question : l'énergie nucléaire, les antibiotiques (pourtant, la pénicilline, inventée par Alexandre Fleming, existait depuis huit ans), les avions à réaction, les fusées et l'utilisation de l'espace, les ordinateurs – et pas un mot sur les transistors. Etant passés à côté des technologies qui ont marqué la seconde moitié du ^{xx}e siècle, comment auraient-ils pu prévoir les transformations sociales et politiques advenues au cours de cette période ?

Les scientifiques eux-mêmes ne prévoient souvent pas les implications de leurs propres découvertes. Ernest Rutherford, le plus grand physicien nucléaire de son époque, est connu pour avoir traité de « sornettes » l'utilité supposée de l'énergie nucléaire ; les pionniers de la radio considéraient que les transmissions sans fil étaient plus un substitut du télégraphe qu'un moyen de diffusion d'« une personne vers plusieurs » ; ni le grand mathématicien et concepteur informatique John von Neumann, ni le fondateur d'IBM, Thomas J. Watson, n'ont envisagé que les besoins en ordinateurs de l'ensemble des États-Unis dépasseraient un petit nombre de ces machines. Nos

omniprésents téléphones mobiles et agendas électroniques auraient effaré il y a un siècle ; et d'autres qu'Arthur C. Clarke ont affirmé que toute technologie un peu avancée est comparable à de la magie. Alors, que pourrait-il arriver au cours de ce siècle qui nous semblerait « magique » ?

Les prévisionnistes, généralement incapables de prédire les grands bouleversements nés de découvertes totalement imprévisibles, sont en revanche trop prompts à prédire les changements progressifs, souvent bien lents au regard de la technique existante. Clarke était un visionnaire rare mais il nous faudra sans doute attendre bien au-delà de 2001 pour assister à l'installation de grandes colonies spatiales ou de bases lunaires. Qui plus est, la technologie en matière d'aviation civile piétine, comme celle des vols spatiaux habités – en règle générale, la technologie des transports progresse plus lentement que prévu. Logiquement, nous devrions pouvoir voyager en avions supersoniques, mais ce n'est pas le cas ; pour des raisons d'économies et d'environnement, nous traversons l'Atlantique dans des avions à réaction dont les performances n'ont pour ainsi dire pas évolué depuis quarante-cinq ans et ne le feront sans doute pas pendant encore une vingtaine d'années. Ce qui a changé, c'est l'intensité du trafic aérien : les trajets longue distance sont maintenant à la portée de presque toutes les bourses. Bien sûr, des améliorations techniques se font jour, par exemple dans le domaine des contrôles informatisés et du guidage par satellite grâce au système GPS ; pour les passagers, les changements les plus évidents se trouvent dans les gadgets toujours plus sophistiqués destinés à les distraire en vol. De même, les

voitures que nous conduisons ne progressent que lentement depuis dix ans.

Clarke et la plupart de ses pairs se sont en revanche laissé surprendre par la prolifération et la sophistication accélérées des ordinateurs personnels et leurs retombées. La vitesse à laquelle les circuits sont gravés sur les puces électroniques double tous les dix-huit mois depuis près de trente ans, conformément à la célèbre « loi » énoncée par Gordon Moore, co-fondateur d'Inter Corporation. Les consoles de jeux ont ainsi des processeurs bien plus performants que ceux des ordinateurs des astronautes d'Apollo à l'époque où ils mirent le pied sur la Lune. Aujourd'hui, mon collègue de Cambridge George Efstahiou, qui simule sur ordinateur la formation et l'évolution des galaxies, peut, pendant son heure de déjeuner, refaire sur son portable les calculs qui lui prirent des mois sur le super ordinateur dont il disposait en 1980, alors l'un des plus puissants qui soient. Nous conversons aujourd'hui sur nos téléphones mobiles mais bientôt, nous pourrions aussi effectuer des communications à grande largeur de bande et accéder instantanément à toutes les connaissances disponibles en ligne. La révolution génomique – une des découvertes majeures du début du XXI^e siècle – progresse elle aussi de plus en plus vite et surprend ceux qui ne s'attendaient pas à ce que l'ambitieux projet de cartographie du génome humain soit quasiment achevé aujourd'hui.

Francis Bacon faisait la différence entre ses trois découvertes « magiques » et l'invention de l'imprimerie, où « tout était déjà dit et généralement évident... il semble impensable qu'il ait fallu tant de temps pour s'en apercevoir ». Comme l'imprimerie, la plupart des inventions émergent, selon Bacon, « grâce au transfert, la

composition et l'application de [faits] déjà connus », et les artefacts et gadgets que nous connaissons aujourd'hui résultent la plupart du temps du cheminement continu d'améliorations progressives. Mais même si nous bénéficions à présent d'infrastructures inimaginables aux siècles précédents, des innovations révolutionnaires peuvent encore advenir⁴. De fait, plus nous repoussons les limites de nos connaissances, plus nous avons de chances d'être surpris par des choses étonnantes.

Plus loin, plus vite ?

Comme on ne peut raisonnablement extrapoler à l'infini les connaissances dont on dispose aujourd'hui et dire jusqu'où peut aller la science en l'espace d'un siècle, il faut se contenter de garder l'esprit ouvert ; des concepts qui, pour l'instant, nous semblent pour le moins spéculatifs, pourraient donner lieu à des données scientifiques à ce point inimaginables que nous ne sommes même pas en mesure de les nommer.

Selon Ray Kurzweil, grand prêtre de l'« intelligence artificielle » et auteur de *The Age of Spiritual Machines*⁵, au XXI^e siècle, « 20 000 ans de progrès seront accomplis au rythme d'aujourd'hui ». Façon de parler, bien sûr, puisque le « progrès » ne peut être quantifié que dans des domaines donnés.

Par exemple, la précision avec laquelle on peut graver les puces de silicone, ou la qualité de définition des images des microscopes et télescopes sont physiquement limitées, mais des procédés innovants permettant une impression beaucoup plus fine des circuits⁶ sont déjà en cours de développement ; la « loi de Moore » est donc

toujours valable. D'ici dix ans, nous pourrions nous connecter à un système Internet sophistiqué et au dispositif de guidage par satellite grâce à des ordinateurs de la taille d'une montre et, un peu plus tard, la puissance de ces derniers sera peut-être encore augmentée grâce à de minuscules rayons optiques entrecroisés – technique radicalement différente et libérée des circuits à puces.

La miniaturisation, déjà étonnante aujourd'hui, est en effet très loin d'avoir atteint ses limites théoriques. Chaque composant d'un circuit à puces contient des milliards d'atomes : déjà infiniment petit, ce type de circuit (de la taille d'un micron, c'est-à-dire un millionième de mètre) est encore relativement énorme et « grossier » comparé au plus réduit des circuits en principe concevable, dont la taille ne devrait pas dépasser un nanomètre (un milliardième de mètre.) A long terme, on espère pouvoir fabriquer des pyramides de nanostructures et de circuits en fixant de simples atomes à des molécules, c'est-à-dire en reproduisant la façon dont les organismes vivants grandissent et se développent, et en copiant la structure des « ordinateurs » de la nature ; le cerveau d'un insecte possède en effet plus ou moins la même capacité de traitement qu'un de nos puissants ordinateurs.

Les partisans de la nanotechnologie⁷ prévoient de fabriquer des processeurs mille fois plus réduits qu'ils ne le sont actuellement, capables de stocker l'information dans des mémoires un milliard de fois plus compactes, grâce à un « assembleur » qui capture et mélange des atomes simples pour les introduire un par un dans des machines dont les composants ne sont pas plus gros que des molécules. Les nanomachines, dont la structure moléculaire pourrait être aussi complexe et plus

variée que celle des virus et des cellules vivantes, seraient capables d'entreprendre des tâches de fabrication, de circuler dans notre corps pour l'explorer, et même de procéder à des interventions micro-chirurgicales !

La nanotechnologie pourrait prolonger de trente ans la loi de Moore ; les ordinateurs auraient alors des processeurs d'une capacité semblable à celle du cerveau humain, et nous évoluerions tous dans un cyberspace nous permettant de communiquer instantanément, par la voix et le regard mais aussi grâce à une réalité virtuelle complexe.

D'après le pionnier de la robotique Hans Moravec⁸, les machines parviendront à une intelligence égale ou supérieure à la nôtre. Mais les processeurs n'y suffiront pas ; il faudra leur adjoindre des détecteurs capables de voir et d'entendre comme nous, ainsi qu'un logiciel de traitement et d'interprétation des données transmises. Les logiciels progressent beaucoup plus lentement que le matériel informatique (un ordinateur n'arrive pas à la cheville d'un enfant de trois ans quand il s'agit de reconnaître et de manipuler des objets solides), mais peut-être parviendra-t-on à améliorer leurs performances en essayant de « faire régresser » le cerveau humain au lieu d'augmenter la vitesse des processeurs traditionnels et de les miniaturiser. Car dès lors que les ordinateurs pourront observer et interpréter leur environnement comme nous le faisons, leurs pensées et leurs réactions bien plus rapides leur donneront peut-être l'avantage sur nous. Il s'agirait alors vraiment d'objets (ou d'êtres) intelligents, avec lesquels nous pourrions échanger, dans certains domaines en tout cas, comme nous le faisons avec notre entourage. Se poseront alors des questions d'éthique. Car s'il nous incombe de faire en sorte que nos semblables

(et un certain nombre d'espèces animales) soient satisfaits de leur vie, au nom de quoi n'aurions-nous pas les mêmes responsabilités envers les robots sophistiqués que nous aurons créés ? Et pourquoi ne nous sentirions-nous pas obligés de pourvoir à leur bien-être, et de nous sentir coupables s'ils étaient malheureux ?

L'avenir sera-t-il humain ou posthumain ?

Ces projections impliquent que nos descendants restent visiblement « humains ». Or, sous peu, le caractère et l'aspect physique de l'homme seront eux-mêmes malléables. De nouvelles drogues ou des ordinateurs implantés dans nos cerveaux pourraient accroître certaines de nos capacités intellectuelles – nos fonctions logiques ou mathématiques mais aussi notre créativité. Nous pourrions peut-être nous « brancher » de la mémoire supplémentaire, ou acquérir des connaissances en transférant directement celles-ci dans nos cerveaux (par injection d'un « doctorat instantané », par exemple). John Sulston, l'un des responsables du projet de génome humain, voit encore plus loin : « Quelle quantité de matériel non biologique pouvons-nous adjoindre au corps humain sans cesser de le qualifier d'humain ? ... Un peu plus de mémoire, peut-être ? Plus de capacité de traitement ? Pourquoi pas ? Et si c'est le cas, une certaine immortalité est peut-être à portée de main⁹. »

Un pas de plus consisterait à faire régresser le cerveau humain pour en extraire des pensées et des souvenirs que l'on téléchargerait dans une machine ou que l'on reconstituerait artificiellement. Les humains pourraient alors transcender la biologie en fusionnant

avec des ordinateurs et, ce faisant, perdre leur individualité et évoluer vers une conscience collective. Si les tendances techniques actuelles continuaient sur leur lancée, elles donneraient raison à Moravec, selon lequel certains individus actuellement en vie pourraient atteindre l'immortalité – c'est-à-dire une durée de vie dépassant leur enveloppe corporelle. Ceux qui souhaitent l'immortalité devraient ainsi abandonner leurs corps et faire télécharger leur cerveau dans des machines de silicium, passant ainsi « sur l'autre rive », selon l'expression spiritualiste un peu surannée.

Peut-être que la toute dernière invention humaine dont nous aurons besoin sera une machine hyper intelligente. En effet, dès lors qu'elle aura surpassé l'intelligence humaine, elle pourra à son tour en concevoir et en fabriquer d'autres encore plus intelligentes, et ainsi de suite ; la technologie filera alors vers un sommet, ou « singularité » (terme que le futurologue californien Vernon Vinge¹⁰ fut le premier à utiliser dans ce contexte d'apocalypse), à partir de laquelle l'innovation rejoindra l'infini. On ne peut dire à quoi ressemblera le monde une fois atteinte cette « singularité », car les limites dictées par les lois physiques actuelles ne seront peut-être plus les mêmes : certaines des « données de base » de la science théorique qui laissent les physiciens d'aujourd'hui perplexes – voyage dans le temps, distorsions de l'espace, etc. – pourront être exploitées par les nouvelles machines, engendrant une transformation physique du monde.

Kurzweil et Vinge sont évidemment à la frontière (et même au-delà) du visionnaire, en liant prédiction scientifique et science-fiction. La croyance dans la « singularité » touche en effet aux grands courants de la

futurologie, un peu comme l'espoir millénariste d'« extase » – le fait d'être physiquement happé vers les cieux lors du Dernier Jour – relève des grands courants du christianisme.

L'espace, toile de fond immuable

Les systèmes informatiques et la biotechnologie peuvent progresser à pas de géant, car ils ne dépendent pas d'infrastructures encombrantes dont la mise en place requiert des années et qu'il faut exploiter pendant des décennies, comme par exemple les centrales électriques classiques et les infrastructures de transports. Tout n'est pas aussi facilement transformable que le matériel électronique.

Selon les scénarios optimistes, nos infrastructures, débarrassées des lourdeurs du passé, devraient se transformer au cours du XXI^e siècle. Il existera toujours des routes et probablement des chemins de fer ; cependant, des innovations permettront de voyager dans de nouvelles conditions (par exemple, le guidage par satellite évitera peut-être les collisions de véhicules terrestres ou aériens). Mais, sauf catastrophe majeure – ou avancée technologique vers une « singularité », auquel cas les super robots pourraient transformer le monde plus radicalement que ce que nous pouvons imaginer aujourd'hui – la vitesse à laquelle notre environnement pourrait changer est bornée par l'énergie et les ressources : sauf invention d'un avion ou d'un véhicule terrestre totalement innovant, il est peu probable que tout le monde puisse voyager à bord d'engins supersoniques. De toute façon, les déplacements dans leur ensemble deviendront

superflus dans la mesure où les télécommunications et la réalité virtuelle prendront le pas sur eux.

Qu'en sera-t-il de l'exploitation de l'espace, grâce à de nouveaux systèmes de propulsion, par exemple ? D'ici cinquante ans, si notre civilisation n'a pas irréversiblement régressé, des esprits entreprenants et aventuriers (plus sûrement que des gouvernements) mettront en place un programme spatial ambitieux. Les vols habités seront remplacés par la robotique et la miniaturisation : une foule de minuscules satellites tournera en orbite autour de la Terre, des sondes errantes très perfectionnées exploreront l'ensemble du système solaire, et des robots-ouvriers construiront d'énormes bâtiments et extrairont peut-être des matériaux du sol lunaire ou des astéroïdes.

Cette présence accrue de l'homme dans l'espace ne concernera peut-être qu'une petite partie de l'humanité (l'environnement n'est nulle part aussi clément que sur la Terre), mais l'espace peut constituer le décor où, grâce aux explorateurs et aux pionniers, des communautés humaines autonomes s'installeront peut-être sur la Lune, sur Mars, ou flotteront librement dans l'espace, devenu refuge ou but d'exploration. Savoir si nous investirons l'espace et de quelle façon peut s'avérer d'une importance capitale pour l'évolution post humaine et celle de la vie intelligente au cours des siècles à venir. Car si c'était le cas, et bien que cela soit de peu de consolation pour les humains restés sur Terre, cela signifierait que la vie aurait réussi à « s'extirper » de l'ère de danger maximal et serait à l'abri d'une catastrophe terrestre capable, à long terme, de détruire le potentiel cosmique.

Le monde réel : des horizons plus vastes

Selon les prévisionnistes de la technologie, dont le comportement est dicté par le contexte socio-politique de la côte Ouest des Etats-Unis où vivent tant d'entre eux, les changements se font sans heurts dans une société qui encourage les innovations, et les motivations consuméristes dominent toutes les autres idéologies. Cette façon de voir est aussi erronée que le serait le fait de minimiser le rôle de la religion dans le commerce international, ou d'affirmer que, loin de régresser vers son éradication, l'Afrique sub-saharienne progresse régulièrement depuis les années 1970. Les événements socio-politiques imprévisibles accroissent en fait l'incertitude, et une de mes intentions est de montrer que le progrès technique contribue à fragiliser la société.

Mais même si cette dernière n'était pas plus perturbée demain qu'elle ne l'est aujourd'hui, ce genre de prévisions ne donne qu'un aperçu de ce qui pourrait arriver, à savoir le fossé susceptible de se creuser entre le potentiel technique et les réalisations tangibles. Pour la simple raison que certaines innovations ne créent pas assez de demandes socio-économiques : de même que les voyages en avion supersonique et les vols spatiaux habités stagnent depuis la décennie 1970, les potentialités de la technologie à large bande (G3) sont aujourd'hui, en 2003, appliquées lentement, parce que peu d'entre nous ont envie de surfer sur Internet ou de regarder des films sur leur téléphone mobile.

Dans le domaine des biotechnologies, les obstacles seront davantage éthiques qu'économiques, car, si aucune réglementation ne devait freiner l'application des techniques génétiques, les mutations possibles d'ici

quelques générations porteraient sur l'aspect physique et la mentalité des humains. Pour les futuristes comme Freeman Dyson¹¹, l'homo sapiens se sera peut-être, d'ici quelques siècles, diversifié en plusieurs sous-espèces et adapté à des milieux autres que la Terre.

Les décisions économiques, dont la durée est souvent limitée à celle des échéances électorales, ne tiennent généralement pas compte de ce qui peut arriver au-delà de vingt ans, les risques commerciaux n'étant pris en compte qu'en fonction de leur rentabilité immédiate, a fortiori quand il s'agit de projets rapidement obsolètes. Il arrive cependant qu'on planifie sur cinquante ans, comme c'est le cas pour la politique énergétique, par exemple. Certains économistes tentent d'encourager les projets à long terme prudemment conservateurs et évaluent financièrement les ressources naturelles d'un pays pour montrer à quel point leur épuisement pèserait sur le budget national. Ainsi, les débats sur le réchauffement planétaire tiennent compte de ce qui pourrait arriver dans un ou deux siècles, et le Protocole de Kyoto prévoit que les gouvernements doivent dès aujourd'hui intervenir préventivement dans l'intérêt supposé de ceux qui nous succéderont au XXII^e siècle (même si rien ne dit que ces actions préventives seront effectivement entreprises).

Le domaine que les gouvernements gèrent à plus long terme encore, non seulement à des centaines mais à des milliers d'années, est celui de l'élimination des déchets radioactifs des centrales nucléaires, dont certains restent toxiques pendant plusieurs milliers d'années. En Grande-Bretagne et aux Etats-Unis, la législation portant sur leur enfouissement exige que les matières dangereuses demeurent scellées – c'est-à-dire sans risque

possible de fuite dans la nappe phréatique ou de fissures dues aux séismes – pour une durée d'au moins dix mille ans. Ce sont ces contraintes géologiques, imposées par l'agence américaine pour la protection de l'environnement, qui ont pesé dans la décision d'enfouir les déchets américains sous la Yucca Mountain, au Nevada.

Les débats sans fin sur les déchets radioactifs ont au moins l'avantage de faire prendre conscience des répercussions de nos actes sur les milliers d'années futures ; ce laps de temps ne représente évidemment pas grand-chose comparé à l'avenir de la planète Terre, mais il dépasse de très loin les perspectives des planificateurs et des responsables décisionnaires. Dans l'optique d'alerter nos lointains descendants sur les dangers cachés des dépôts de déchets radioactifs, le département américain de l'Energie a même invité un groupe d'intellectuels de tous horizons à débattre du meilleur message susceptible d'être compris par des êtres humains (s'il devait en exister) dans plusieurs milliers d'années.

Pour encourager la réflexion à long terme, Danny Hillis (inventeur de la « Connection Machine », un des premiers ordinateurs à processeur massivement parallèle) a fondé la Long Now Foundation ; celle-ci se propose de fabriquer une grande horloge capable de durer très longtemps et qui enregistrerait le passage de plusieurs milliers d'années. Et dans son ouvrage *The Clock of the Long Now*¹², Steward Brand passe en revue les façons d'optimiser le contenu des bibliothèques, des capsules de temps et autres artefacts durables qui pourraient nous inciter à lever les yeux vers des horizons plus lointains.

Même si les changements ne devaient pas se faire plus rapidement qu'au cours des quelques siècles précédents, les cultures et les institutions politiques, qui se

transforment en l'espace de mille ans, sont censées se « passer le flambeau ». Or, un effondrement de la civilisation détruirait cette continuité, provoquant une rupture aussi importante que le fossé culturel que nous pouvons éprouver aujourd'hui face à une lointaine tribu d'Amazonie. Dans *A Canticale for Leibowitz*¹³ de Walter M. Miller, l'Amérique du Nord retombe dans un état primitif à la suite d'un conflit nucléaire dévastateur ; l'Eglise catholique étant la seule institution à survivre, des générations de prêtres essaient, au cours de plusieurs siècles, de reconstituer, à partir de fragments d'archives et de reliques, les connaissances et la technologie d'avant le conflit. James Lovelock (qui a inventé le concept de Gaia¹⁴, où la biosphère est comparée à un organisme auto-régulé) réclame quant à lui l'élaboration d'un « manuel de l'utilisateur de la civilisation », qui traiterait des évolutions technologiques comme, par exemple, les techniques agricoles, de l'élevage à base de sélection jusqu'à la génétique moderne ; la diffusion de ce manuel serait telle qu'un certain nombre d'exemplaires survivraient à tout.

En nous faisant prendre conscience d'horizons plus lointains, les instigateurs du *Long Now* nous rappellent que le bien-être des générations à venir ne doit pas être menacé par nos comportements imprudents. Cependant, le *Long Now* sous-estime peut-être les conséquences qualitativement nouvelles des ordinateurs et de la technologie. Pour les optimistes, celles-ci mèneront aux transformations dont il est question dans ce chapitre ; quant aux réalistes, ils acceptent de concevoir que ces progrès mèneront à un nouveau péril. Les perspectives évoluent si rapidement que l'humanité pourrait même ne pas survivre au-delà d'un siècle – bien moins que mille

ans – à moins que la communauté internationale n'adopte des politiques durables et de moindre risque fondées sur la technologie actuelle. Mais ceci exigerait un impossible frein aux nouvelles découvertes et aux innovations. Une prévision plus réaliste est que la survie de la société sur la Terre sera, d'ici un siècle, exposée à des défis si menaçants que le niveau de radioactivité au Nevada, d'ici à des milliers d'années, ne signifiera plus rien. De fait, le chapitre suivant suggère que nous devons à la chance d'avoir survécu sans catastrophe au cours des dernières cinquante années.

3.

L'horloge de la fin des temps

Est-ce la chance qui nous a permis de survivre aussi longtemps ?

Si nous avions été conscients de la gravité des risques que nous courions pendant la guerre froide, beaucoup d'entre nous auraient refusé d'y croire. Aujourd'hui, le danger nucléaire est toujours là mais il ne représente rien, comparé aux risques auxquels nous exposent les sciences nouvelles.

Les pires catastrophes qu'ait eu à subir l'humanité au cours de presque toute son histoire ont été le fait des épidémies et des forces naturelles – inondations, séismes, éruptions volcaniques, ouragans. Mais celles que nous avons traversées au ^{xx}e siècle n'étaient dues qu'à nous-mêmes ; ce siècle est peut-être en effet le premier au

cours duquel les guerres et les dictatures ont causé plus de morts que les fléaux de la nature : une étude¹ indique que les deux guerres mondiales et leurs cohortes de massacres, de persécutions et de famines programmées ont engendré 187 millions de victimes. Ces catastrophes ont pourtant eu lieu dans un contexte de mieux-être croissant et ce, non seulement dans les pays riches mais dans nombre de nations en voie de développement, où l'espérance de vie à la naissance a presque doublé, et où a baissé le nombre de personnes vivant dans des conditions de grande pauvreté.

C'est lors de la seconde moitié du xx^e siècle que l'humanité a vécu sous une menace inédite : un conflit atomique mondial. Celui-ci a été évité jusqu'à présent mais le danger existe depuis plus de quarante ans. Comme le déclara le Président Kennedy lui-même lors de la crise des missiles de Cuba en 1962, le risque d'une guerre nucléaire était d'environ « un sur trois ». Au cours de ces décennies, celui-ci ne fit bien sûr qu'augmenter et il s'en fallut de peu que, confusion et erreurs d'appréciation aidant, les super puissances ne réagissent de façon incontrôlée et ne nous mènent vers une fin du monde annoncée.

Selon l'historien Arthur Schlesinger Jr., alors un des bras droits de Kennedy, la crise des missiles cubains fut « non seulement le moment le plus dangereux de la guerre froide mais le plus dangereux de l'histoire de l'humanité. Avant, jamais deux puissances en conflit n'avaient eu ensemble les moyens de faire sauter le monde. Heureusement que Kennedy et Khrouchtchev étaient des chefs d'Etats raisonnables, sinon nous ne serions sans doute pas là aujourd'hui². »

Robert McNamara, ministre américain de la Défense

à l'époque, comme il le fut aussi pendant la guerre du Vietnam, écrivit plus tard : « Une faible probabilité de catastrophe est en soi un risque élevé, et je pense que nous devrions cesser de l'accepter... Cette crise fut à mon sens la mieux gérée de toutes celles de la guerre froide ; il n'en reste pas moins que, sans le savoir, nous avons été à un cheveu du conflit nucléaire. Nous n'avons pas à nous féliciter de l'avoir évité – j'entends par là que la chance, autant que la raison, a joué en notre faveur... Après la crise des missiles cubains, il m'est clairement apparu que la faillibilité humaine (dont nous ne nous déferons jamais) ajoutée à la possession d'armes nucléaires est un mélange qui mène très probablement à la destruction des pays³. »

Pendant la guerre froide, nous avons tous été soumis à ce jeu de hasard. Les pessimistes eux-mêmes n'imaginaient sans doute pas que le risque de conflit nucléaire s'élevait à 50 %. Nous avons donc plus de chances de nous en sortir que le contraire et il n'est pas surprenant que cela ait été le cas, mais cela ne signifie pas que le risque auquel nous étions exposés était un risque prudent ; pas plus que cela ne justifie la politique de dissuasion nucléaire pratiquée pendant la guerre froide par les super-puissances qui brandissaient la menace de représailles massives.

Le jeu en valait-il la chandelle ?

Supposez que l'on vous propose de jouer à la roulette russe (une balle engagée dans l'une des six chambres du revolver) : si vous en sortez vivant, vous gagnerez cinquante dollars. Ce qui se passera probablement (cinq

chances contre une en votre faveur) est que vous en sortirez gagnant, c'est-à-dire toujours vivant et avec cinquante dollars de plus en poche. Mais à moins que la vie ne représente pas grand-chose pour vous, le risque que vous aurez pris aura été très imprudent – pour ne pas dire complètement fou ; car pour que quelqu'un de raisonnable risque sa vie avec si peu de chances de s'en sortir, il faut que la récompense soit extrêmement élevée – cinq millions de dollars, par exemple, et non cinquante dollars. De même, si vous êtes malade et avez peu de chances de guérir sans être opéré, alors – et alors seulement – vous opterez pour une opération qui n'a qu'une chance sur six d'échouer.

Valait-il donc la peine de nous exposer aux risques auxquels le monde entier a été confronté pendant la guerre froide ? La réponse dépend évidemment de ce qu'était vraiment la probabilité de conflit nucléaire ; et force nous est d'accepter ce qu'en dit un responsable comme McNamara, qui semble estimer le risque d'alors à bien plus que de un sur six. Mais la réponse dépend aussi de ce qui serait advenu faute de dissuasion nucléaire : quelles étaient les probabilités d'expansion soviétique, et aurions-nous préféré « être plutôt rouges que morts » ? Il serait intéressant de savoir ce que pensaient les autres responsables politiques du danger auquel ils nous exposaient, et quels risques les citoyens auraient acceptés si on leur avait demandé leur avis. Personnellement, je n'aurais pas choisi d'opter pour un risque qui comportait une chance sur six de désastre susceptible de coûter la vie à des centaines de millions de personnes et de détruire toutes nos villes, même si l'autre face du choix était à coup sûr la mainmise soviétique sur l'Europe de l'Ouest. Sans compter que les conséquences

d'un conflit nucléaire n'auraient pas seulement touché les pays dont les gouvernements en avaient implicitement accepté le risque, mais aussi et plus gravement la plupart des nations du tiers-monde, déjà fragilisées par les catastrophes naturelles.

La science, moteur de la course aux armements

Le *Bulletin of Atomic Scientists*⁴ a été créé à la fin de la Seconde Guerre mondiale par un groupe de physiciens de Chicago ; la plupart avaient travaillé à Los Alamos sur le Projet Manhattan, qui consistait à concevoir et à fabriquer les bombes atomiques qui ont été larguées sur Hiroshima et Nagasaki. C'est un magazine encore dynamique et influent, qui traite principalement du contrôle des armes et de politique nucléaire. Le logo qui figure sur la couverture de chaque numéro est une horloge dont les aiguilles, très proches de minuit, illustrent la précarité de la situation mondiale, telle que l'apprécient les responsables du magazine. Depuis 1947, la grande aiguille est ainsi avancée ou reculée tous les deux ou trois ans, parfois plus souvent, en fonction des crises liées aux relations internationales. En ce moment, elle est plus près de minuit qu'elle ne l'était dans les années 1970.

C'est néanmoins dans les années 1950 que l'horloge signala le risque le plus élevé, l'aiguille n'étant qu'à deux ou trois minutes de minuit. A la réflexion, cela se justifiait : c'est au cours de cette décennie que les Etats-Unis et l'Union Soviétique acquirent la bombe H et de nombreuses armes atomiques (fissiles). Quand on y songe, l'Europe eut de la chance d'échapper à la destruction

nucléaire dans ces années-là. Des armes nucléaires dites tactiques (dont l'une avait pour nom « Davy Crockett ») étaient détenues par les bataillons ; les dispositifs de sécurité étaient moins sophistiqués qu'ils ne le devinrent par la suite, et le danger qu'un conflit nucléaire ne soit déclenché par inadvertance ou erreur de jugement bien réel. Et le monde se trouva, semble-t-il, dans une posture encore plus dangereuse quand les avions bombardiers furent épaulés par des missiles balistiques, capables de traverser l'Atlantique en une demi-heure, ne laissant à l'adversaire que quelques minutes pour décider ou non de procéder à des représailles massives avant que son propre arsenal ne soit détruit.

Après la crise des missiles cubains, la gestion du risque nucléaire devint l'une des premières priorités politiques, et l'on encouragea à nouveau la signature de traités, à commencer par celui interdisant les essais nucléaires dans l'atmosphère et qui fut signé en 1963. Mais ceci ne mit pas pour autant fin aux rivalités en matière de fabrication d'armes plus « sophistiquées ». « Dans la course à l'armement, quasiment chaque innovation technique vient des Etats-Unis, notait McNamara. Mais ceux d'en face les rattrapent toujours très vite⁵. » Ce syndrome réapparut à la fin des années 1960, quand on trouva le moyen de fixer plusieurs têtes nucléaires sur un seul missile, chacune étant dirigée sur une cible différente. Ce dispositif, appelé MIRVing (pour « multiple independently targeted reentry vehicle »), fut imaginé par des technologues américains puis fabriqué par eux-mêmes et leurs collègues soviétiques. On parvint ainsi à accroître l'insécurité des deux côtés : l'un « enchérissait » sur ce que faisait l'autre, surestimait la menace, puis réagissait de façon excessive.

Une autre innovation, les missiles anti-missiles destinés à protéger les villes et sites stratégiques contre le largage de têtes nucléaires, put être maîtrisée grâce à la conclusion par les super puissances du Traité des missiles anti-balistiques, auquel des scientifiques contribuèrent en coulisses, arguant du fait que tout système de défense tendrait à déstabiliser « l'équilibre de la terreur » et donnerait lieu à des contre-mesures qui y mettraient fin.

Dans les années 1980, l'aiguille de l'horloge du *Bulletin of Atomic Scientists* se rapprocha à nouveau de minuit. C'est lors de cette décennie que la Grande-Bretagne et l'Allemagne acquirent de nouvelles armes nucléaires de taille intermédiaire, pour soi-disant rendre plus crédible la menace de représailles occidentales en cas d'attaque soviétique sur l'Europe de l'Ouest. Il s'agissait surtout de réduire le risque omniprésent d'escalade vers un conflit atomique, prémédité ou bien dû à des dysfonctionnements ou des erreurs de calculs. Sur une année, ce risque était négligeable mais il serait devenu plus sérieux si la situation était restée telle quelle.

Dans les années 1980, le stock d'armes nucléaires de la Russie, de l'Europe et de l'Amérique équivalait à dix tonnes de TNT par habitant. Carl Sagan et d'autres instituèrent un débat autour de la question de savoir si un conflit nucléaire mondial provoquerait un « hiver nucléaire⁶ » qui, en empêchant le Soleil de briller, aurait, entre autres conséquences, entraîné des destructions massives semblables à celles d'un éventuel impact de comète ou d'astéroïde géant. On supputa finalement que même l'explosion de dix mille mégatonnes ne pourrait provoquer un black-out total de longue durée. Des doutes subsistent cependant encore quant à la fiabilité de la simulation ; on ignore en particulier la hauteur

qu'atteindraient les débris projetés dans la stratosphère et combien de temps ils y resteraient. Quoi qu'il en soit, le scénario de « l'hiver nucléaire » permet de prendre conscience que les principales victimes d'une guerre atomique seraient les populations d'Asie du Sud, d'Afrique et d'Amérique latine, dont la plupart n'étaient pas parties prenantes dans la guerre froide.

Ce fut l'époque de l'Initiative de défense stratégique, ou « Guerre des étoiles », et le Traité des missiles anti-balistiques fut à nouveau à l'ordre du jour. La construction d'un « bouclier » défensif capable de rendre les armes nucléaires « impuissantes et obsoètes », but proclamé du Président Reagan, semblait techniquement infaisable, et les contre-mesures persistaient à opter pour l'attaque. Ce traité est à nouveau et une fois de plus remis en question par les Etats-Unis au prétexte qu'il interdit la mise en place d'un dispositif de défense antimissile contre d'éventuels bombardements de missiles de la part d'« Etats voyous ». La principale objection à l'égard de ce type de système défensif est, à supposer qu'il s'avère efficace – au prix d'efforts et d'investissements considérables – son impuissance face à une agression nucléaire sommaire de la part d'« Etats voyous », c'est-à-dire le catapultage d'une bombe de fabrication artisanale à partir d'un bateau ou d'un camion. L'abrogation de ce traité serait déplorable et ouvrirait la voie à « l'armement » de l'espace. Les armes anti-satellites sont en effet parfaitement concevables et relativement simples à fabriquer ; à côté de la difficulté que représente l'interception d'un missile attaquant, un objet positionné sur une orbite connue et prévisible serait une « cible facile » : les communications, la navigation et

les satellites de surveillance seraient facilement détruits. On risquerait aussi qu'un « Etat voyou » soit tenté de neutraliser les défenses antimissiles basées sur satellite en polluant l'espace par la mise en orbite de débris, stratagème qui empêcherait l'utilisation de l'espace par les satellites en orbite à basse altitude.

Solly Zuckerman, expert et conseiller scientifique de longue date du gouvernement britannique, fut (une fois à la retraite) aussi prompt que Robert McNamara à dénoncer l'absurdité dangereuse de l'escalade ayant conduit aux gigantesques et meurtriers stocks d'armes nucléaires américain et soviétique. Selon lui, « tout cela [était] d'autant plus fou que ce n'est pas les militaires qui ont en premier imaginé ce nouveau type d'armement mais des groupes de scientifiques et de technologues... Cet avenir angoissant était le fait des technologues, non parce qu'ils avaient des intuitions visionnaires sur la façon dont le monde devait évoluer, mais parce qu'ils faisaient tout simplement ce qu'ils pensaient être leur travail... A la base, la dynamique de la course aux armements a de toute évidence été donnée par les techniciens des laboratoires gouvernementaux et des fabricants d'armes⁷. »

Les employés des laboratoires d'armement dont le savoir-faire dépassait la compétence routinière, ou qui faisaient preuve d'idées originales, ajoutèrent leur grain de sel à cet état de faits préoccupant. Les chercheurs en matière d'armement, poursuit Zuckerman, « sont devenus les alchimistes modernes, travaillant dans le secret et jetant des sorts qui nous affectent tous. Ils ne sont peut-être jamais allés au combat, n'ont peut-être jamais subi les horreurs de la guerre, mais ils savent fabriquer les moyens de destruction. »

Depuis les années 1980, époque où Zuckerman écrivait ceci, d'autres innovations auraient sans doute contribué à intensifier la course aux armements de façon non négligeable si l'ordre du jour n'avait pas changé du tout au tout. Après la fin de la guerre froide, la menace d'un conflit nucléaire majeur cessa en effet de planer au-dessus de nous (encore qu'Américains et Russes continuent à déployer des milliers de missiles) et, au début des années 1990, l'aiguille de l'horloge du *Bulletin of Atomist Scientists* descendit à minuit moins dix-sept. Elle remonte cependant lentement, et elle marquait minuit moins sept en 2002. Car nous assistons à une prolifération des armes nucléaires (en Inde et au Pakistan, par exemple) et à de nouveaux aléas effarants. Ils n'augurent pas systématiquement d'une soudaine catastrophe planétaire (réflexion faite, la métaphore de l'horloge de fin du temps n'est peut-être pas si bien trouvée) mais, additionnés, ils s'avèrent tout aussi inquiétants. Vue d'ici, la politique figée mais relativement prévisible de l'« ère de stagnation » de Leonid Brejnev et de la rivalité des super puissances est presque rassurante.

Pendant toute la décennie 1990, de gigantesques provisions d'armes nucléaires ont été accumulées, et c'est encore le cas aujourd'hui. Les accords prévoyant de réduire le déploiement des armes atomiques sont les bienvenus, mais comment gérer et détruire les quelque vingt ou trente mille bombes et missiles gisant ici ou là ? Certes, ces traités exigent le démantèlement de la plupart des têtes nucléaires, celles-ci devant être ôtées des missiles et stockées séparément, et les programmes de ciblage peuvent être annulés ; ces mesures, qui impliquent un moindre besoin en main-d'œuvre et en

savoir-faire, contribuent à la mise en veille des arsenaux. Mais le défi technique majeur le plus long à accomplir sera la destruction de toutes ces armes, ainsi que de leur uranium et de leur plutonium. On peut réduire la dangerosité de l'uranium 235 hautement enrichi (encore qu'il est toujours utilisé dans des réacteurs nucléaires pacifiques), en le mélangeant à de l'uranium 238 ; en 1993, les Américains ont accepté d'acheter à la Russie, sur une période de plus de vingt ans, jusqu'à 500 tonnes d'uranium ainsi dilué anciennement destiné à l'armement. Se débarrasser du plutonium est moins évident. Les Russes refusent de considérer comme un « déchet » ce matériau chèrement gagné, mais les centrales nucléaires existantes ne sont pas équipées de « surgénérateurs » capables de brûler le plutonium. La meilleure solution est de l'enterrer, de le rendre inutilisable en le mélangeant à des déchets radioactifs, ou de le brûler partiellement dans un réacteur nucléaire. Selon Richard Garwin et Georges Charpak, « Le surplus total de matière nucléaire russe suffirait à fabriquer près de 10 000 armes au plutonium et 60 000 armes d'implosion à l'uranium. La mise hors d'état de nuire de cette matière est véritablement une tâche dantesque⁸. »

Tant que tout n'est pas détruit, il faut continuer à sécuriser et à inventorier de façon fiable l'ensemble de l'armement nucléaire de l'ex-Union Soviétique, sinon, c'est bien plus que le stock des « petites » puissances nucléaires qui passera entre les mains de groupes terroristes ou rebelles, comme on soupçonne malheureusement que ce fut le cas (même si l'on n'en a aucune preuve tangible) au cours de la période de transition chaotique du début des années 1990.

Les groupes dissidents sont encore très loin de pouvoir financer la construction d'un missile à longue portée transportant une ogive nucléaire compacte, mais celle-ci est devenue plausible et il faut en tenir compte. Comme le guidage par satellite est aujourd'hui à la portée de tout le monde, un missile de type missile de croisière pourrait être guidé par un dispositif disponible dans le commerce. Et un missile terre-terre serait plus difficile à déceler et à intercepter qu'un missile balistique. Faire exploser une bombe transportée par camion ou par bateau et fabriquer, dans un appartement, un système explosif rudimentaire à base d'uranium volé sont des procédés techniquement très peu exigeants ; et, contrairement à une bombe larguée par missile, la provenance d'un tel engin serait indécélable.

Lutte contre la prolifération des armes nucléaires

L'environnement nucléaire présente au moins un aspect rassurant : le nombre de puissances nucléaires a certes augmenté, mais pas aussi rapidement que prévu par beaucoup d'experts ; elles seraient au nombre de dix, en comptant les « non déclarées », comme Israël. Au moins vingt pays se sont abstenus de surmonter les problèmes techniques alors qu'ils en avaient les moyens ; il s'agit entre autres du Japon, de l'Allemagne et du Brésil. L'Afrique du Sud a, quant à elle, mis au point six armes nucléaires, mais elle les a démantelées.

Quand les négociations sur le Traité sur la non-prolifération (TNP) ont débuté en 1967, on prit acte du statut spécial des cinq pays détenteurs de l'arme atomique : Etats-Unis, Grande-Bretagne, France, Russie et

Chine. Pour que les autres nations ne prennent pas ombrage de cette « discrimination », le traité stipulait que ces puissances nucléaires devaient « poursuivre de bonne foi des négociations sur des mesures efficaces relatives à la cessation de la course aux armements nucléaires... » et à « l'arrêt de toutes explosions expérimentales d'armes nucléaires à tout jamais... » (TNP, Art. VI, version française du texte original conclu à Londres, Moscou et Washington le 1^{er} juillet 1968. Source : Internet.)

Le TNP aurait plus de poids si ces cinq pays acceptaient en échange de procéder à une réduction radicale de leurs propres arsenaux. Selon les traités actuellement en vigueur, il faudra par exemple dix ans pour que le déploiement d'armes atomiques américain baisse au moins à deux cents ogives – et celles qui seront mises hors d'état ne seront pas irréversiblement détruites, mais stockées. C'est également avec réticence que les puissances nucléaires ont accepté une interdiction totale des essais visant à réduire la prolifération d'armes encore plus sophistiquées ; les Etats-Unis ont, quant à eux, refusé de signer ce traité. Des essais intermittents soi-disant nécessaires sont censés vérifier la « fiabilité » des armes stockées – en d'autres termes, qu'elles fonctionneront bien si besoin est. On tente de savoir si le test séparé des composants, par simulation sur ordinateur par exemple, serait suffisamment fiable. Cette fiabilité ne servira peut-être à rien, sauf à un agresseur envisageant d'attaquer pour la première fois, puisqu'un missile nucléaire reste dissuasif même si sa charge n'a que 50 % de chance d'exploser. On dit aussi que les essais sont nécessaires pour s'assurer que les armes sont « sûres », c'est-à-dire qu'elles n'exploseront pas ou ne généreront

pas de radioactivité dangereuse en cas de manipulation accidentelle. Un autre argument avancé par les opposants à l'interdiction totale des essais est qu'il est impossible de vérifier que cette interdiction est effectivement respectée : les essais souterrains supérieurs à quelques kilotonnes laissent des traces sismiques évidentes, mais ceux inférieurs à un kilotonne peuvent se fondre parmi les nombreux séismes mineurs, et s'ils ont lieu dans de grandes cavités, ils sont parfois étouffés. On ignore le nombre précis de stations sismologiques nécessaires à la vérification, et la façon dont les services de renseignements ou la surveillance par satellite pourraient aussi y procéder. Selon un rapport de l'académie des sciences américaine, il est impossible de se livrer à des essais indétectables, et ceux nécessaires à la mise au point de nouvelles armes « plus sophistiquées » ne sont pas destinés au maintien des stocks d'armes existants⁹.

En soi, l'interdiction totale des essais ne mettrait pas fin à la prolifération car il est toujours possible, sans essai, de fabriquer une bombe fissile de première génération efficace. Mais l'interdiction empêcherait les puissances nucléaires actuelles (les Etats-Unis en particulier) de mettre au point de nouveaux types de bombes, ce qui serait propice au TNP, lequel enjoint à toutes les puissances nucléaires de réduire leurs arsenaux... Pour lutter efficacement contre la prolifération, il faudrait avant tout étendre le rôle de l'Agence internationale de l'énergie atomique, qui doit être en mesure de savoir qui détient des matières nucléaires récemment acquises, et de procéder à des inspections sur place. Comme on le sait, cette question est à l'origine de la crise avec l'Iraq.

Mais le facteur déterminant demeure l'intérêt d'un pays à faire partie du club des nations nucléarisées. Les pays actuellement dotés de l'arme atomique pourraient contribuer à la dissuasion en minimisant le rôle du nucléaire dans leur arsenal défensif. A cet égard, les récentes déclarations américaines et britanniques quant à l'utilisation éventuelle de bombes à faible portée pour attaquer les cachettes terroristes souterraines constituent un véritable pas en arrière ; elles atténuent la dimension nucléaire, banalisent l'utilisation de la bombe, et attisent l'envie des autres pays de se la procurer – envie qui va déjà croissant, puisqu'il ne semble pas exister d'autre moyen de dissuader les pressions américaines indésirables ou de s'en protéger : la supériorité des Etats-Unis en matière d'armes conventionnelles « intelligentes » est telle que ce pays peut, à moindre coût humain pour lui-même, imposer sa volonté aux autres.

L'inquiétude de la communauté scientifique

Les spécialistes de l'atome de Chicago ne sont pas les seuls à avoir tenté, hors des voies officielles, d'influer sur le débat politique lié au risque nucléaire depuis la fin de la guerre froide. Un autre groupe a mis sur pied une série de conférences, surnommées Pugwash¹⁰, du nom du village de Nouvelle-Ecosse où s'est tenue la première d'entre elles sous la houlette du millionnaire canadien Cyrus Eaton, lui-même natif de ce village. Les participants soviétiques et occidentaux aux premières conférences avaient généralement eu un rôle actif dans la Seconde Guerre mondiale ; ayant travaillé sur le projet de bombe atomique ou sur celui du radar, ils continuaient

à y accorder une attention inquiète. A une époque – les années 1960-1970 – où les contacts officiels étaient rares, les conférences de Pugwash permettaient aux Américains et aux Soviétiques de se rencontrer de façon informelle.

Certaines des grandes figures scientifiques de cette génération sont encore en vie. Le plus âgé est Hans Bethe, né en 1906 à Strasbourg. Eminent physicien nucléaire dans les années 1930, il quitta l'Allemagne pour enseigner aux Etats-Unis et, pendant la Seconde Guerre mondiale, dirigea le département théorique de Los Alamos. Par la suite, il retourna à la Cornell University où, aujourd'hui encore, il participe activement au renforcement du contrôle des armes nucléaires, tout en poursuivant ses recherches (il s'intéresse depuis peu à la théorie des étoiles explosives et des supernovas). De tous les physiciens vivants, Bethe est sans doute l'un des plus respectés dans le monde, non seulement pour ses connaissances scientifiques mais parce qu'il ne cesse de s'inquiéter de leurs conséquences. C'est peut-être le seul parmi ses pairs à publier des travaux pointus depuis plus de soixante-dix ans. En 1999, son attitude face à la recherche militaire s'est durcie, et il a instamment incité les scientifiques à « cesser de travailler à la conception, la mise au point et la sophistication des armes nucléaires et de destruction massive¹¹ » qui encourage la course aux armements.

J'ai également eu le privilège de faire la connaissance de Joseph Rotblat, autre vétéran de Los Alamos. De deux ans plus jeune que Bethe, il est né en Pologne, où l'enfant qu'il était a vécu les horreurs de la Première Guerre mondiale, et où débuta sa carrière de chercheur. En 1939, il se réfugia en Angleterre (sa femme ne put

l'y rejoindre et mourut en camp de concentration) et travailla à Liverpool avec l'éminent physicien nucléaire James Chadwick. Rotblat fit partie du Projet Manhattan à Los Alamos en tant que membre du petit contingent britannique. Il décida de s'en retirer prématurément lorsque la défaite allemande ne fit plus de doute, car, selon lui, le projet de bombe ne se justifiait que pour faire contrepoids à l'arme atomique éventuellement détenue par Hitler. De fait, il se rappelle avoir perdu ses illusions en entendant le général Grover, responsable du projet, dire, dès mars 1944, que le but principal de la bombe était d'« en imposer aux Russes ».

Rotblat rentra en Angleterre où il enseigna la biophysique et devint un pionnier de la recherche sur les effets de l'exposition aux radiations. En 1955, il encouragea Bertrand Russell à rédiger un manifeste insistant sur l'urgence de réduire le danger nucléaire. L'un des derniers actes d'Einstein fut d'accepter de signer ce document, dont les auteurs déclaraient avec inquiétude « s'exprimer ici non parce que nous appartenons à telle ou telle nation, tel continent ou telle croyance, mais en tant qu'êtres humains, appartenant à l'espèce humaine, dont la survie est menacée¹² ». C'est ce manifeste qui fut à l'origine de la création des conférences de Pugwash en 1957 ; depuis, Rotblat est resté le premier moteur et l'inspirateur infatigable de celles-ci. Quand, en 1995, le prix Nobel de la Paix leur fut attribué, il sembla juste de le partager à égalité entre l'organisme et Rotblat en personne. Celui-ci, aujourd'hui âgé de quatre-vingt-quatorze ans, milite inlassablement et avec l'énergie d'un jeune homme pour l'éradication totale de l'arme atomique. Cette cause, que l'on dit souvent irréaliste et le fait de marginaux idéalistes et irresponsables, prête à

sourire. Elle est cependant soutenue par un nombre grandissant de personnes grâce à Rotblat – un idéaliste, certes, mais sans illusion quant au fossé qui sépare l'espoir de l'attente.

« L'affirmation selon laquelle les armes nucléaires peuvent être stockées à perpétuité sans jamais être utilisées – accidentellement ou intentionnellement – défie la raison. » Cette déclaration ferme figure dans un rapport établi en 1997 par un groupe de personnalités de tous les pays, mis en place par le gouvernement australien et connu sous le nom de Commission de Canberra¹³. Parmi ses membres figurent Rotblat, mais aussi l'ancien Premier ministre français Michel Rocard, Robert McNamara et des généraux en retraite des forces armées terrestres et aériennes. Cette commission affirme que la seule raison d'être militaire de l'arme atomique est de dissuader les autres de s'en servir, et elle fait des recommandations point par point susceptibles de nous faire progresser sans heurt vers un monde débarrassé de l'arme nucléaire.

Ceux qui sortirent de leurs confortables laboratoires de recherches pour participer au projet Manhattan appartenaient à ce qui, a posteriori, fut surnommé la « génération dorée » des physiciens, nombre d'entre eux ayant eu un rôle prédominant dans la découverte de l'atome et des nucléons. Conscients d'avoir été projetés par le destin dans des événements historiques, la plupart retournèrent à leurs tâches académiques mais restèrent préoccupés par les armes nucléaires. Tous furent profondément mais diversement marqués par leur participation au Projet Manhattan, comme le montrent les carrières que les deux sommités, J. Robert Oppenheimer et Edward Teller¹⁴, épousèrent après-guerre. (Andrei Sak-

harov, leur contrepartie russe la plus connue, impliqué dans l'invention de la bombe H après la guerre, était un peu plus jeune.)

Les savants atomistes de Chicago et les pionniers du mouvement Pugwash ont admirablement montré la voie aux chercheurs de toutes les disciplines scientifiques ayant de profonds impacts sociaux : ils ont refusé de n'être « que des savants » et de dire que l'utilisation de leur travail ne regarde que les seuls responsables politiques. Ils ont agi en fonction du principe selon lequel un savant doit être concerné par les résultats de ses recherches ; il doit veiller à la façon dont ses idées sont mises en pratique, c'est-à-dire apprécier, et même encourager, leurs retombées simples, mais s'opposer, autant que faire se peut, à leurs applications dangereuses ou menaçantes, et informer le public sur celles-ci.

Au cours de ce siècle, les aléas et les dangers viendront de la biologie et des sciences informatiques autant que de la physique, et dans tous ces domaines, la société aura grand besoin de statures telles que Bethe et Rotblat. Ces derniers devraient en particulier inspirer les chercheurs universitaires et leurs collègues indépendants, car ceux-ci sont plus libres que les savants au service des gouvernements ou des sociétés, soumis aux pressions commerciales.

Les menaces de l'après 2000

Terreur et erreur

D'ici vingt ans, le terrorisme et les erreurs biologiques pourraient tuer un million d'êtres humains. Qu'est-ce que ceci augure pour les décennies à venir ?

Je mets la dernière main à ce chapitre en décembre 2002, un peu plus d'un an après les attentats du 11 septembre aux Etats-Unis. Depuis cette tragédie, on craint que d'autres actes de barbarie ne viennent s'inscrire dans notre mémoire collective ; Israël est d'ailleurs terrorisé par une série d'attentats suicides perpétrés par de jeunes Palestiniens (hommes et femmes) intelligents mais à l'idéalisme dévoyé. A la fin du xx^e siècle, des groupes terroristes organisés animés d'intentions politiques sensées (ceux opérant en Irlande, par exemple) se sont,

malgré leur extrémisme, interdit de commettre le pire parce qu'ils jugeaient qu'au-delà d'une certaine limite, cela desservirait leur cause ; les terroristes d'Al Qaida qui ont précipité les avions sur le World Trade Center et le Pentagone n'ont, quant à eux, pas eu de tels scrupules. Si ces gens-là devaient se procurer des armes nucléaires, ils n'hésiteraient pas à les faire exploser dans des villes, tuant des milliers de personnes avec eux – et seraient acclamés en héros par des millions de personnes dans le monde. Pires seraient les conséquences d'une épidémie de variole – ou de futurs virus plus meurtriers encore, pour lesquels il n'existera pas d'antidote – déclenchée par un fanatique suicidaire ayant intentionnellement contracté cette maladie.

Dans les années 1950, les savants bien informés du danger nucléaire étaient déjà inquiets, comme en témoigne le manifeste Einstein-Russell : « Aucun d'eux ne dira que le pire adviendra certainement. Ce qu'ils disent, c'est que le pire est possible, et personne ne peut affirmer qu'il n'advient pas. Nous ignorons encore si les avis des experts sur ces problèmes ont quoi que ce soit à voir avec leurs opinions politiques ou leurs préjugés. Les résultats de nos recherches révèlent que leurs avis ne se fondent que sur les connaissances de tel chercheur en particulier et que [ceux] qui en savent le plus sont les plus pessimistes. »

Ceci pourrait s'appliquer aux risques non moins graves qui se profilent aujourd'hui, car la technologie du XXI^e siècle laisse entrevoir d'incommensurables perspectives meurtrières, inconnues du temps de la guerre froide. Qui plus est, les criminels potentiels sont plus nombreux aujourd'hui et, venant d'horizons divers, ils sont difficilement identifiables. Les nouveaux risques sont

« asymétriques » : ils n'émanent pas d'Etats-nations mais de groupuscules et même d'individus isolés.

A supposer que des lois strictes sur la manipulation des matières nucléaires et des virus dangereux soient imposées dans tous les pays, elles ne seraient sans doute pas plus respectées à l'échelle mondiale que celles qui réglementent les drogues illicites ; or, une seule infraction suffit pour déclencher une catastrophe majeure. On ne peut évidemment jamais écarter ce risque à cent pour cent, mais aujourd'hui, ce dernier semble sur le point de devenir moins maîtrisable et donc plus menaçant. Chaque pays a en effet toujours son lot de marginaux aigris, mais la « pression » que chacun d'eux peut exercer s'accroît. S'ajoutent à cela des menaces d'un autre ordre. Dans le domaine du cyberspace, par exemple, la concurrence qui fait rage en matière de tentatives pour renforcer la fiabilité et la sauvegarde des systèmes n'a d'égale que l'ingénuité croissante des malfaiteurs susceptibles de s'introduire dans ces systèmes et de les saboter.

Le méga danger nucléaire

Le danger lié au nucléaire est de taille. Comme dans *The Sum of our Fears* (La somme de toutes les peurs), roman de Tom Clancy dont l'adaptation filmée est sortie en 2002, il suffirait de voler un dispositif nucléaire et de le faire exploser dans un stade de football bondé pour provoquer un carnage¹. La puissance de destruction d'une explosion atomique est en effet un million de fois supérieure par kilo à celle d'une explosion chimique. Lors de l'attentat d'Oklahoma City – qui causa plus de

160 morts et fut le plus meurtrier qui soit advenu sur le sol américain avant le 11 septembre 2001 –, la bombe utilisée équivalait à environ trois tonnes de TNT ; quant aux stocks de l'ex-Union Soviétique et des Etats-Unis, ils représentent la même quantité d'explosif par habitant de la population mondiale : on imagine ce qui adviendrait si une quantité infime de cet arsenal – disons une seule des dizaines de milliers de têtes nucléaires existant actuellement – était utilisée à mauvais escient.

Les bombes au plutonium sont déclenchées par une implosion dont la configuration complexe ne serait peut-être techniquement pas à la portée des groupes terroristes. Mais on peut enduire de plutonium la surface d'une bombe conventionnelle et en faire une « bombe sale » ; celle-ci ne provoquerait pas plus de morts immédiates qu'une grosse bombe conventionnelle, mais ses conséquences à long terme seraient considérables dans la mesure où ses retombées très radioactives pollueraient des superficies importantes. L'uranium enrichi (U_{-235} séparé) constituerait un risque terroriste encore plus grand, car il est beaucoup plus facile de provoquer une véritable explosion nucléaire en utilisant cette énergie. Selon le prix Nobel de physique Luis Alvarez : « Avec l'uranium de qualité militaire, ... des terroristes pourraient déclencher une explosion de grande portée en se contentant de lâcher la moitié de cette matière sur l'autre moitié. La plupart des gens semblent ignorer que déclencher une explosion atomique à partir d' U_{-235} séparé est un jeu d'enfant, alors qu'à mes yeux, si l'on ne dispose que de plutonium, le faire exploser est ce qu'il y a de plus difficile². » Alvarez semble sous-estimer la difficulté à fabriquer une arme à l'uranium ; il est néanmoins exact que l'on peut déclencher une explosion en

propulsant, à l'aide d'un canon ou d'un mortier, une masse sur-critique en forme de coquillage ou de balle à l'intérieur d'une autre masse sur-critique en forme d'anneau ou de cylindre creux.

Une explosion au World Trade Center à base de deux morceaux d'uranium enrichi de la taille d'une grappe de raisin dévasterait le sud de Manhattan sur plus de trois kilomètres carrés, dont tout Wall Street³ ; si elle avait lieu pendant les heures de travail, elle ferait des centaines de milliers de morts, et il en irait de même dans d'autres grandes villes. Des explosifs conventionnels pourraient provoquer des désastres de même ampleur s'ils étaient par exemple déclenchés dans le but de détruire des réservoirs de pétrole ou de gaz naturels. (De fait, l'explosion du World Trade Center en 1993 aurait pu être aussi dévastatrice que l'attentat de 2001 si l'explosion, déclenchée dans un coin des fondations de l'immeuble, avait provoqué la chute d'une des tours, car celle-ci se serait écrasée sur l'autre.) « Nous avons vaincu le dragon mais nous vivons à présent dans une jungle où pullulent les serpents venimeux⁴ » ; James Wolsey, ex-responsable de la CIA, a fait cette comparaison en 1993 pour désigner les turbulences qui suivirent la chute de l'Union Soviétique et la fin de la guerre froide, mais dix ans plus tard, elle s'applique plus encore aux groupes invisibles qui nous menacent.

Ces risques à court terme montrent qu'il est primordial de surveiller le plutonium et l'uranium enrichi de la Communauté d'Etats indépendants (CEI) née de l'ex-Union Soviétique. A supposer qu'il ne soit pas déjà trop tard : étant donné le laxisme ayant régné là-bas dans les années 1990, rien ne dit que les rebelles Tchétchènes et

d'autres groupuscules ne se sont pas emparés d'une partie de ces matières stratégiques.

En 2001, l'Amérique a néanmoins réduit l'aide de trois milliards de dollars destinée à la Russie et à la CEI pour qu'elles ferment les centrales nucléaires, découragent les « défections » de chercheurs et se débarrassent du plutonium – tout ceci étant pourtant autrement plus urgent que la « défense missile nationale ». Un pas positif a cependant été accompli avec la création de l'Initiative de menace nucléaire, créée par le fondateur de CNN Ted Turner et présidée par l'ancien sénateur Sam Nunn ; cet organisme auto-financé se sert de ses contacts politiques pour encourager les mesures allant dans le sens d'une réduction du danger nucléaire.

Le terrorisme est un risque nouveau qui doit nous faire appréhender différemment les centrales nucléaires civiles en provisionnant davantage les coûts d'investissement élevés, fermer les centrales problématiques et gérer les déchets toxiques que nous laisserons aux générations à venir. Outre le « cœur » hautement radioactif, une centrale nucléaire renferme aussi un stock de crayons combustibles potentiellement dangereux : leur seule mise à feu suffirait en effet à produire dix fois plus de césium-137 (dont la demi-vie est de trente ans) que lors de l'accident de Tchernobyl.

Pour tenter de réduire la probabilité d'accidents majeurs à moins de un par million « d'années-réacteurs », les constructeurs de réacteurs prennent en compte toutes les éventualités de pannes et d'accidents, y compris celle qu'un gros avion ne s'écrase sur le caisson de confinement. D'après des estimations fondées sur les rapports d'accidents aériens et les projections futures, le risque de chute d'avions en général n'est que

de quelques-uns par an pour l'Europe et l'Amérique du Nord, et la possibilité qu'ils ne s'écrasent sur le caisson de confinement⁵ en particulier est heureusement très basse : bien inférieure à une sur un million par an. Mais nous savons aujourd'hui que ces calculs sont erronés : ils ne tiennent pas compte du risque qui fait maintenant partie de nos cauchemars, à savoir que des terroristes kamikazes peuvent choisir une centrale pour cible et y précipiter un gros avion plein de kérosène, ou un petit appareil chargé d'explosifs. Les techniciens et ingénieurs les plus doués ne peuvent pas évaluer ce risque, dans la mesure où il relève du jugement politique ou sociologique ; il faudrait cependant être d'un optimisme naïf pour l'estimer inférieur à un sur cent par an. Si l'on avait tenu compte de cette probabilité élevée lors de la programmation des centrales nucléaires existantes, celles-ci n'auraient peut-être pas été construites, et il se pourrait que les normes de sécurité afférant aux futures centrales exigent que celles-ci soient enfouies sous terre.

Quoi qu'il en soit, le rôle de l'énergie atomique pourrait diminuer au cours des vingt prochaines années si les centrales existantes atteignaient la fin de leur durée de vie et n'étaient pas remplacées. Mais si l'énergie nucléaire contribuait de façon importante à réduire les émissions de gaz à effet de serre, plusieurs milliers de nouvelles centrales seraient nécessaires. Outre les risques de sabotage et de terrorisme, les chances d'accidents augmentent si la maintenance n'est pas fiable. Et, à la différence de certaines compagnies aériennes du tiers-monde dont les mesures de sécurité médiocres ne mettent en danger que leurs passagers, les réacteurs mal entretenus constituent une menace qui dépasse les frontières nationales.

L'énergie nucléaire serait promise à un avenir meilleur si de nouveaux types de réacteurs fissiles, capables de surmonter les problèmes de sécurité des centrales, se banalisaient. La fusion nucléaire (version maîtrisée du processus permettant au Soleil de briller et qui fait fonctionner la bombe H) est quant à elle une perspective à long terme. Bien que depuis longtemps considérée comme une source d'énergie inépuisable, elle ne fait plus partie des projets immédiats : elle a pris un faux départ dans les années 1950, avant que les vraies difficultés ne surgissent, et son utilisation n'est apparemment pas envisageable avant une trentaine d'années au moins.

Fusion ou fission, l'énergie nucléaire a pour principal avantage de résoudre simultanément deux problèmes : les réserves de pétrole limitées et le réchauffement de la Terre. Mais il serait mieux, pour l'environnement et la sécurité, de lui préférer les matières renouvelables. Celles-ci satisferont certainement un volume croissant des besoins du monde, mais il faudra un certain nombre de progrès techniques pour qu'elles répondent à la demande mondiale ; les turbines éoliennes seules, par exemple, ne suffiront pas, et la transformation de l'énergie solaire est trop chère et pas assez efficace. Mais si cette dernière pouvait être maîtrisée par un matériau photovoltaïque économique et fiable pouvant être étendu sur de vastes superficies de terres non productives, alors, ce qu'on appelle « l'économie à l'hydrogène » serait possible : des centrales électriques à énergie solaire extraîraient l'hydrogène de l'eau, cet hydrogène pourrait ensuite être utilisé dans des cellules de pétrole, qui remplaceraient les engins à combustion interne.

Les bio-risques

Plus inquiétants que les risques nucléaires sont les dangers potentiels liés à la microbiologie et à la génétique. Plusieurs pays cherchent depuis des dizaines d'années et dans le plus grand secret à fabriquer des armes chimiques et biologiques ; on soupçonne l'Iraq de poursuivre un programme offensif, comme l'a fait l'Afrique du Sud dans le passé. Les techniques de fabrication et de dispersion d'agents pathogènes mortels sont de mieux en mieux maîtrisées, surtout aux Etats-Unis et en Grande-Bretagne où l'on ne cesse de chercher à améliorer les systèmes de défense contre ce type d'attaques.

Pendant les années 1970 et 1980, l'Union Soviétique mobilisa comme jamais ses chercheurs dans le but de développer des armes biologiques et chimiques. L'un de ceux-ci, Kanatjan Alibekov (qui occidentalisa son nom en Ken Alibek quand il passa à l'Ouest en 1992) fut à un moment donné l'un des responsables du programme *Biopreparat*. Dans son ouvrage *Biohazard*⁶, il fait état d'une équipe de plus de trente mille ouvriers et décrit les efforts entrepris pour modifier les organismes de façon à les rendre plus virulents et plus résistants aux vaccins. En 1992, Boris Eltsin admit ce que les observateurs occidentaux suspectaient depuis longtemps, à savoir qu'au moins soixante-six des morts mystérieuses advenues dans la ville de Sverdlovsk en 1979 étaient dues à des champignons de la maladie du charbon provenant d'un des laboratoires de *Biopreparat*.

La guerre biologique ou chimique est longtemps restée perçue comme un choix médiocre pour les pays non dotés de l'arme atomique. Mais aujourd'hui, une attaque dévastatrice n'a plus besoin d'être organisée à

l'échelle d'un Etat ou d'une organisation, des individus isolés pouvant se procurer ce qu'il faut – le problème majeur consiste donc à gérer ces groupes ou groupuscules. Contrairement aux techniques d'enrichissement de l'uranium destiné aux armes fissiles, qui nécessitent un équipement sophistiqué non réutilisable, la fabrication de produits chimiques ou de toxines mortels exige en effet peu de matériel ; celui-ci est en outre quasiment le même qu'en médecine ou en agriculture et les techniques et le savoir-faire sont réutilisables. Selon Fred Ikle, « Les connaissances et les techniques requises dans la fabrication de super armes biologiques seront dispersées dans les laboratoires de recherches hospitaliers ou agricoles et les usines existant un peu partout. Seul un Etat policier pourrait contrôler officiellement ces nouveaux instruments pour s'en servir comme armes de destruction massive⁷. »

Des milliers, voire des millions d'individus pourront un jour accéder aux moyens de disséminer des « armes » susceptibles de provoquer des pandémies, certaines pouvant se propager dans le monde entier. Il suffirait que quelques membres d'une secte suicidaire, ou même un seul individu aigri, déclenchent ce type d'attaque. De fait, des bio-attaques mineures ont déjà été tentées, mais leurs auteurs n'étaient pas suffisamment compétents et les techniques utilisées trop rudimentaires pour atteindre la puissance de destruction d'un explosif conventionnel. En 1984, des disciples de la secte Rajneeshee (l'homme aux saris jaunes et aux cinquante Rolls Royce) contaminèrent à la salmonelle des bars à sandwich de Wasco, dans l'Etat d'Oregon ; 750 personnes furent atteintes de gastro-entérite. Le but de cette opération était, semble-t-il, d'empêcher les habitants

d'aller voter aux élections municipales, ce qui aurait favorisé l'adoption d'un plan d'urbanisme dans la commune où était basée la secte. Mais l'origine de cette épidémie ne fut découverte qu'un an plus tard, ce qui montre bien la difficulté à retrouver les auteurs d'une attaque biologique. La secte japonaise Aum Shinrikyo qui, au début des années 1990, mit au point plusieurs agents pathogènes, dont la toxine botulique, la fièvre Q et la maladie du charbon, lâcha du sarin, un gaz neurotoxique, dans le métro de Tokyo, faisant douze morts ; les victimes auraient pu être bien plus nombreuses si la dispersion du gaz dans l'air avait été plus efficace.

En septembre 2001, des enveloppes contenant des champignons de la maladie du charbon furent adressées à deux sénateurs américains ainsi qu'à plusieurs médias. Il y eut cinq morts – événement tragique mais de moindre ampleur que le nombre d'accidents de la route mortels enregistrés en une journée. Mais – et ceci est important – la couverture médiatique américaine de cet événement provoqua une « vague de terreur » déferlant sur tout le pays. On imagine facilement les conséquences psychologiques sur la population d'une attaque qui ferait des milliers de victimes. De fait, l'impact de ce type d'attentat pourrait être plus grave avec une variante de la bactérie résistant aux antibiotiques et, bien sûr, si sa dispersion était efficace. Cette menace pousse à la « course aux armes » biologiques, qui consiste à essayer de créer des drogues et des virus pouvant cibler une bactérie spécifique, et à fabriquer des détecteurs pour déceler les agents pathogènes au sein de concentrations infimes.

Quels seraient les effets d'une attaque biologique aujourd'hui ?

Les études et essais effectués pour évaluer les conséquences possibles d'une attaque biologique et la réponse des services d'urgence sont nombreux. En 1970, l'Organisation mondiale de la santé estima que le largage par avion de cinquante kilos de champignons de la maladie du charbon sur une ville pourrait causer près de cent mille morts. Plus récemment, en 1999, le groupe Jason, un consortium de chercheurs très pointus, conseillers régulier du ministère de la Défense américain, a imaginé plusieurs scénarios⁸ pour tenter d'imaginer ce qui se passerait si le virus de l'anthrax était lâché dans le métro de New York, le microbe se répandant dans les tunnels via les passagers. Si l'opération se faisait à l'insu du public, les premiers signes de la maladie apparaîtraient seulement quelques jours plus tard, au moment où les victimes (alors dispersées dans tout le pays) se plaindraient de symptômes auprès de leurs médecins.

Le groupe Jason a également étudié les effets du ricin, un agent chimique qui attaque les ribosomes et perturbe l'action des protéines, et dont la dose mortelle n'est que de dix microgrammes. Mais l'attaque au sarin dans le métro de Tokyo a tout de même épargné des milliers de personnes, preuve que la dispersion d'un agent pathogène est techniquement complexe.

Parvenir à une dispersion aérienne efficace est une difficulté commune à tous les agents chimiques, comme aux agents biologiques non infectieux (l'anthrax, par exemple), même s'il est vrai que quelques grammes d'un agent pathogène pourraient *en principe* causer des millions de morts.

Pour ce qui est des maladies infectieuses, la dispersion initiale n'est pas un facteur aussi déterminant que pour l'anthrax (qui ne se transmet pas d'un individu à l'autre), et même une dispersion localisée, en particulier sur une population mobile, pourrait provoquer une épidémie de grande ampleur. A cet égard, le plus inquiétant des virus connus est celui de la variole. Il a été totalement éradiqué grâce aux efforts louables entrepris par l'OMS dans les années 1970, mais deux stocks en ont été conservés, l'un au Center for Disease Control à Atlanta en Amérique, l'autre dans un laboratoire de Moscou au nom inquiétant de Vector. La raison avancée est que ces virus pourraient servir à la fabrication de vaccins, mais on soupçonne l'existence de lieux de stockage clandestins dans d'autres pays, ce qui accroît les craintes d'actions terroristes liées à ce virus.

Cette maladie presque aussi contagieuse que les oreillons tue près d'un tiers des individus atteints. Selon plusieurs études officielles portant sur les conséquences d'une propagation de ce virus mortel, celles-ci seraient catastrophiques pour une grande ville, même si l'épidémie était maîtrisée et que les victimes ne s'élevaient qu'à quelques centaines. Les médicaments manqueraient, surtout en l'absence de vaccins suffisants, et si l'épidémie s'étendait au-delà des frontières, elle causerait plusieurs millions de morts.

En juillet 2001, une opération américaine appelée « Hiver noir⁹ » à laquelle participèrent des personnalités (l'ancien sénateur Sam Nunn était le président américain et le gouverneur de l'Oklahoma tenait son propre rôle) simula une attaque secrète de variole aux Etats-Unis accompagnée des réactions et des mesures y afférant. On supposa que les nuages aériens contaminés par le virus

étaient simultanément largués dans trois centres commerciaux de plusieurs Etats. Au pire, le scénario provoquait l'infection de trois millions de personnes (dont un tiers mourait). La vaccination en catastrophe mettait radicalement fin à la dispersion de la maladie (le vaccin reste effectif quatre jours après l'apparition de l'infection). Mais une infection à l'échelle planétaire – le virus étant largué au-dessus d'un aéroport ou lâché dans un avion – pourrait déclencher une épidémie galopante dans des régions du monde où le vaccin est moins disponible que dans les pays industrialisés. La période d'incubation est de douze jours ; donc, à partir du premier cas manifeste, les premières victimes s'éparpilleraient dans le monde entier et induiraient des infections secondaires. Il serait alors trop tard pour imposer une quarantaine efficace.

Dans « Smallpox 2002 : Silent weapon », documentaire diffusé par la BBC, un fanatique suicidaire new-yorkais infecte assez de personnes pour déclencher une pandémie de soixante millions de victimes. Ce scénario de l'extrême s'inspire d'un modèle informatique (peut-être pas complètement fiable) de la façon dont le virus se déploie. Le facteur essentiel des calculs d'évaluation de progression d'une épidémie est le « multiplicateur », c'est-à-dire le nombre de personnes infectées par une victime type. Pour cette évaluation-là, le multiplicateur était de dix. Certains experts font cependant valoir que la variole n'est pas si infectieuse qu'on le dit, que sa transmission interhumaine demande généralement plusieurs heures de proximité, et que ces scénarios exagèrent donc la facilité avec laquelle une personne infectée transmet la maladie. Mais il est prouvé (un accès de variole dans un hôpital allemand en 1970, par exemple) que le virus peut être transmis par les courants d'air et

le contact physique. Selon certains experts, un multiplicateur de dix, approprié pour un hôpital, serait de cinq à l'extérieur ; pour d'autres, le multiplicateur ne serait que de deux.

Ces éléments variables sont d'une importance capitale car ce sont eux qui permettent de déterminer le temps nécessaire pour venir à bout d'une épidémie par la vaccination massive ou la mise en quarantaine. Il serait évidemment plus difficile de la maîtriser si (comme c'est le cas dans le scénario de la BBC) avant d'être détectée, elle était introduite dans les pays en voie de développement, où la réaction face à ce type de situation d'urgence serait plus lente et moins efficace. Et il existe certainement des virus à transmission encore plus rapide. En Grande-Bretagne, l'épidémie de fièvre aphteuse survenue en 2001 a eu des conséquences désastreuses sur l'agriculture nationale malgré les mesures d'envergure prises pour la contenir. Les conséquences d'une infection de ce genre seraient pires encore si la maladie était propagée volontairement. Les attaques biologiques menacent les humains et les animaux mais pourraient aussi menacer les récoltes et les écosystèmes. Récemment le groupe Jason a fait l'expérience de tenter de saboter la production agricole du Mid-West américain pour essayer d'évaluer les dommages que causerait le « wheat rust », un champignon qui sévit à l'état naturel et détruit parfois jusqu'à dix pour cent des récoltes en Californie.

Une des caractéristiques communes à toutes les attaques biologiques est que, même si leurs conséquences n'affectent pas encore le monde entier, elles sont détectées trop tard. En fait, si l'on n'a pas recours à l'arme biologique lors des conflits organisés, ce n'est pas seulement par scrupule mais parce que les militaires

manqueraient de temps et n'auraient pas les moyens de maîtriser la propagation du virus. C'est en cela que les dissidents ou les terroristes isolés détiennent un avantage : celui de pouvoir, en un rien de temps, camoufler l'origine d'une attaque, à l'heure et au lieu où l'agent pathogène a été lâché. On aurait plus de chances de localiser celui-ci rapidement si l'on disposait d'informations et d'analyses médicales au niveau national, car celles-ci permettraient de détecter une soudaine augmentation du nombre de patients présentant tels ou tels symptômes spécifiques, ou l'apparition quasi simultanée d'un syndrome rare ou anormal.

Une attaque, de quelque nature qu'elle soit, provoquerait la débâcle et la panique. La couverture médiatique alarmiste de l'épisode de la maladie du charbon aux Etats-Unis en 2001 montre qu'une menace, même localisée, peut affecter les mentalités de tout un continent. Car même dans l'hypothèse d'une épidémie de variole annoncée avec prudence, la peur et l'hystérie, encouragées et amplifiées par les médias, bouleverseraient la vie quotidienne à l'échelle planétaire.

Des virus artificiels ?

Toutes les épidémies d'avant l'an 2000 (exceptée, peut-être, celle de la maladie du charbon survenue en Russie en 1979) étaient le fait d'agents pathogènes naturels. Aujourd'hui, les progrès en matière de biotechnologies soulèvent d'autres craintes. Selon une étude menée en juin 2002 par l'académie américaine des sciences, « quelques spécialistes ayant accès à un laboratoire pourraient fabriquer à moindre prix toute une

variété d'armes biologiques mortelles susceptibles de menacer sérieusement la population américaine. Ces individus pourraient en outre créer ces agents biologiques à l'aide d'un équipement disponible dans le commerce, c'est-à-dire dont on se sert pour fabriquer des produits chimiques, pharmaceutiques, des aliments ou de la bière, et qui serait donc tout à fait anodin. Le décryptage de la séquence du génome humain et l'élucidation complète de nombreux génomes pathogènes... font que la science peut être utilisée pour créer de nouveaux agents de destruction massive¹⁰. »

Si ce rapport souligne le « bon côté » des nouvelles technologies – elles permettent d'identifier l'apparition d'un agent pathogène et d'y réagir plus rapidement –, il n'en est pas moins préoccupant. Car il admet, même si l'on soupçonne actuellement plutôt des groupes terroristes, qu'un individu « isolé » comme il en existe partout, sachant procéder à des manipulations génétiques et cultiver des micro-organismes, pourrait à lui seul déclencher une épidémie aux conséquences catastrophiques. En 2002, les autorités américaines ont approuvé une augmentation considérable du budget destiné à la défense contre les attaques biologiques ; la conséquence malheureuse de cette mesure est que le savoir-faire dans ce domaine va devenir accessible au plus grand nombre. Selon George Poste, biologiste britannique et conseiller officiel travaillant à présent aux Etats-Unis, « le programme "Biotechnology 101" fait de plus en plus partie du cursus universitaire un peu partout dans le monde ; à supposer que [Unabomber] ait été étudiant dans les années 1990, il serait intéressant de se demander si, au lieu de se servir de bombes, il n'aurait pas choisi de

déposer négligemment tel objet dans une usine de hamburgers¹¹ ».

En juin 2002, Eckard Wimmer et ses collègues de l'Université de New York ont annoncé avoir mis au point un virus de la poliomyélite¹² à partir de l'ADN et d'un programme génétique obtenu sur Internet. Ce virus artificiel présente peu de risques dans la mesure où nous sommes presque tous vaccinés contre la polio, mais il ne serait pas bien compliqué d'en fabriquer des variantes infectieuses, voire mortelles. Les experts savaient depuis longtemps que cette synthèse était plausible, et certains ont reproché à Wimmer de s'être livré à une expérience inutile pour attirer l'attention. Mais pour ce chercheur, la découverte que les virus peuvent être fabriqués aussi facilement « fait froid dans le dos ». Les virus comme la variole, dont les génomes sont plus complexes que celui de la polio, sont techniquement plus difficiles à reproduire ; en outre, on ne pourrait recréer celui de la variole qu'en y ajoutant les enzymes de reproduction provenant d'autres virus de cette maladie. Des virus plus simples mais eux aussi mortels – comme le VIH et l'Ebola, par exemple – pourraient néanmoins être créés dès aujourd'hui en réunissant des chromosomes de gènes individuels, comme l'a fait Wimmer.

D'ici quelques années, les projets génétiques de très nombreux virus, y compris ceux d'animaux ou de plantes, seront archivés dans les bases de données des laboratoires et les chercheurs pourront se les procurer sur Internet. Le projet génétique du virus Ebola, par exemple, est déjà disponible, et des milliers de personnes sont en mesure de le fabriquer en utilisant des fibres d'ADN disponibles dans le commerce. Dans les années 1990, des adeptes de la secte Aum Shinrikyo ont

essayé de retrouver le virus Ebola à l'état naturel en Afrique – sans succès, car il est heureusement rare, mais ils y parviendraient plus facilement aujourd'hui dans un laboratoire personnel. Les ordinateurs personnels et Internet ont en effet ouvert d'énormes perspectives aux apprentis savants. Ceci est un événement de taille mille fois bienvenu dans un domaine comme l'astronomie, mais les motifs d'inquiétude demeurent, face aux moyens dont dispose actuellement une communauté bien informée de biologistes amateurs.

La création de virus de synthèse est une technologie florissante, qui permet à la médecine de mieux appréhender le système immunitaire humain, mais elle facilite aussi les choses à ceux dont le but est de supprimer cette immunité. Une série de virus de synthèse dépourvus d'antidote et contre lesquels on ne pourrait être immunisé pourrait avoir des conséquences planétaires encore plus dévastatrices que celles du SIDA actuellement en Afrique, où il fait reculer des décennies de progrès économique – un équivalent de la variole sans vaccin, par exemple, ou bien un virus à propagation plus rapide que la variole, ou une variante du SIDA transmissible comme la grippe, ou encore une version du virus Ebola, dont la période d'incubation serait plus longue. (Les conséquences de cette horrible maladie contagieuse sont généralement limitées car elle agit très vite, ses victimes succombant par rongement des chairs sans avoir le temps d'infecter leur entourage, contrairement au SIDA, dont l'incubation lente facilite la transmission.)

Si les nouveaux virus créés ne sont pas accompagnés des vaccins correspondants, nous pourrions devenir aussi vulnérables que les Indiens d'Amérique décimés

par les maladies importées par les pionniers européens contre lesquelles ils n'étaient pas immunisés.

Il se peut aussi que les virus artificiels « bousculent l'ordre des choses » et entraînent des changements plus radicaux que ceux de la mutation naturelle¹³. Du fait de celle-ci, il existe déjà des bactéries non réceptives aux antibiotiques – certains services hospitaliers sont infestés de « microbes » qui résistent même à l'antibiotique de dernier recours qu'est la Vancomycine – mais on peut cultiver d'autres souches de ce type. Tout comme on pourrait inventer de nouveaux organismes dont le rôle serait d'attaquer les plantes et même les substances inorganiques.

Et peut-être verrons-nous sous peu l'apparition de nouveaux types de microbes synthétiques génétiquement conçus. Craig Venter, ancien directeur général de Celera, société qui a séquencé le génome humain¹⁴, a déjà annoncé qu'il comptait créer de nouveaux microbes susceptibles de répondre à nos problèmes d'énergie et de réchauffement de la Terre : certains fragmenteraient l'eau en oxygène et en hydrogène (pour « l'économie à l'hydrogène »), d'autres se nourriraient du dioxyde de carbone de l'atmosphère (et ce faisant, combattraient l'effet de serre) et le convertiraient en produits chimiques organiques tels que ceux à base de pétrole et de gaz existant actuellement. La technique de Venter consiste, entre autres, à fabriquer un chromosome artificiel à partir d'environ cinq cents gènes et à l'insérer dans un microbe existant dont le génome a été détruit par radiation. Si cette technique réussissait, elle permettrait d'envisager la création de nouvelles formes de vies se nourrissant d'autres matériaux présents dans l'environnement. Par exemple, on pourrait créer des champignons qui

ingéreraient le plastique de polyuréthane et le détruiraient. Les machines elles-mêmes ne seraient pas à l'abri : des bactéries spécialement conçues pour transformer le pétrole en un matériau cristallin pourraient ainsi provoquer des pannes.

Erreurs expérimentales

Un événement récemment advenu en Australie illustre de façon inquiétante l'accroissement des risques liés aux expériences en laboratoire, davantage dus aux erreurs et aux aléas qu'à la malveillance. Ron Jackson travaillait au centre de recherche de la coopérative de contrôle des animaux à Canberra, un laboratoire d'Etat dont la mission principale est d'améliorer les techniques de dératisation. Avec son collègue Ian Ramshaw, il était en quête de nouveaux moyens de réduire les populations de souris, leur idée étant de modifier le virus de la variole de la souris pour en faire un contraceptif infectieux et stériliser ces rongeurs¹⁵. Au cours de leurs expérimentations, début 2001, ils créèrent par inadvertance une nouvelle souche de variole très virulente et toutes les souris du laboratoire périrent : les chercheurs avaient ajouté un gène à la protéine d'interleukine-4 qui avait accru la production d'anticorps et supprimé le système immunitaire des animaux ; même ceux qui avaient été vaccinés contre la variole étaient donc également morts¹⁶. A supposer que les deux hommes aient travaillé sur le virus de la variole humaine, auraient-ils pu le modifier lui aussi et le rendre encore plus virulent, rendant ainsi le vaccin inefficace ? Comme le dit Richard

Preston, « seul le sens des responsabilités entre biologistes empêche les humains de créer un supervirus ».

Ces expériences en laboratoire, susceptibles de créer involontairement des agents pathogènes plus dangereux que prévu et peut-être plus virulents que tous ceux ayant jamais existé à l'état naturel, constituent le type de dangers auxquels les scientifiques vont être confrontés – et qu'ils devront essayer de minimiser – dans d'autres secteurs de recherche, dont la nanotechnologie (et même la physique fondamentale). La nanotechnologie promet beaucoup à long terme, mais ses inconvénients pourraient s'avérer plus fâcheux que n'importe quelle erreur biologique. On peut imaginer – scénario encore improbable – qu'il soit possible de fabriquer des nanomachines capables, si elles étaient livrées à elles-mêmes, de se reproduire de façon exponentielle jusqu'à ce qu'elles « meurent de faim ». Si leur consommation était très sélective, ces machines remplaceraient utilement les usines chimiques, comme le feraient peut-être les « virus de synthèse ». Mais les choses se gâteraient si ces machines étaient conçues pour être plus omnivores qu'une bactérie et même capables d'avalier des matériaux organiques. Grâce à un métabolisme efficace et à l'énergie solaire, elles proliféreraient sans contrôle et n'atteindraient pas la limite malthusienne avant d'avoir ingéré toute forme de vie.

Eric Drexler a appelé cette cascade d'événements « le scénario grey goo ». « Des "plantes" à "feuilles" guère plus efficaces que nos capteurs solaires actuels pourraient vaincre les plantes réelles et envahir la biosphère d'un feuillage non comestible. Des "bactéries" omnivores résistantes pourraient vaincre les vraies bactéries et se disséminer dans l'air comme du pollen, se

reproduire rapidement et, en l'espace de quelques jours, réduire à néant la biosphère. Des "réplicateurs" dangereux pourraient aisément s'avérer trop petits et trop résistants et se reproduire trop rapidement pour être stoppés – en tout cas si nous ne prenons pas les devants. Nous avons déjà bien du mal à maîtriser les virus et les drosophiles¹⁷. »

Le peuplement soudain né de ces « réplicateurs biovoraces¹⁸ » pourrait ensuite dévaster un continent en quelques jours. Ce scénario-catastrophe est tout à fait théorique, mais il laisse entendre que le développement technologique de machines auto-reproductrices pourrait éventuellement entraîner un désastre à propagation rapide.

Faut-il prendre le danger du « scénario grey goo » au sérieux, même en étendant nos prévisions sur un siècle ? Une propagation galopante de ces réplicateurs ne serait scientifiquement pas impossible mais ceci n'en fait pas un risque sérieux. Une autre technologie futuriste – une fusée spatiale dont le combustible serait de l'anti-matière, et dont la vitesse serait à 90 % celle de la lumière – est, elle aussi, scientifiquement possible, mais nous sommes loin d'en avoir les moyens techniques, et nous le savons. Peut-être ces reproducteurs hyper efficaces se nourrissant de biosphère sont-ils aussi peu réalistes qu'un « vaisseau stellaire », autre exemple conforme aux lois scientifiques et donc théoriquement possible mais loin d'être probable ? Faut-il donc ne voir dans les idées de Drexler et consorts que de la science-fiction destinée à faire peur ?

Les virus et les bactéries sont eux-mêmes des nanomachines superbement conçues, et un mangeur omnivore capable de croître n'importe où gagnerait la course à la

sélection naturelle. Les critiques de Drexler pourraient donc s'étonner que cette catastrophe d'organismes destructeurs n'ait pas surgi par sélection naturelle il y a longtemps. Pourquoi la biosphère serait-elle uniquement menacée par des créatures nées d'une intelligence humaine dévoyée au lieu de s'être auto-détruite « naturellement ¹⁹ » ? Une des réponses à cet argument est que l'être humain peut concevoir des mutations dont la nature est incapable : les généticiens peuvent rendre des singes ou du blé fluorescents par transfert d'un gène de méduse, alors que la sélection naturelle ne peut ainsi sauter les barrières des espèces. De même, la nanotechnologie parvient, en l'espace de quelques décennies, à ce à quoi la nature ne parvient jamais.

Après 2020, les manipulations avancées de virus et de cellules deviendront des lieux communs et les réseaux informatiques intégrés auront pris en main de nombreux aspects de nos vies. Toutes les prévisions pour le milieu du siècle relèvent du domaine des conjectures et des « scénarios ». D'ici là, les nanorobots pourraient être devenus réalité ; de fait, nous serons peut-être si nombreux à tenter de fabriquer des nanoréplicateurs qu'une seule tentative pourrait déclencher une catastrophe. Il est plus facile d'imaginer des menaces extrêmes que des antidotes efficaces.

Ces inquiétudes liées à un avenir apparemment lointain ne doivent pas nous faire oublier les divers aléas dont il est question dans ce chapitre, car ils sont déjà présents et en expansion. Ils devraient nous inspirer au moins autant de « pessimisme » que celui des premiers savants atomistes il y a un siècle face à la menace nucléaire. La gravité d'une menace tient à sa magnitude, multipliée par ses probabilités : c'est ainsi que nous

évaluons nos inquiétudes vis-à-vis des ouragans, des impacts d'astéroïdes et des épidémies. Si nous appliquons ce procédé à tous les risques futurs liés aux activités humaines, nous pouvons nous attendre à ce que les aiguilles de l'horloge de la fin des temps se rapprochent encore de minuit.

Crimes et palliatifs

Alors qu'une poignée d'adeptes de la technique peut menacer la société humaine, le prix à payer pour notre sécurité serait peut-être de renoncer à notre vie privée. Mais une « société transparente » serait-elle suffisamment sûre ?

Nous entrons dans une ère dans laquelle un individu isolé peut, en agissant une seule fois à l'insu de tous, provoquer des millions de morts ou rendre une ville inhabitable pendant des années, et où un dysfonctionnement du cyberspace est susceptible de détruire tout un secteur de l'économie mondiale : les transports aériens, les centrales électriques ou le système financier. De fait, un tel désastre serait davantage le produit de l'incompétence plutôt que d'intentions malveillantes.

Ce risque augmente pour trois raisons. D'abord, les moyens de destruction ou susceptibles de provoquer le

chaos dont dispose un individu formé à la génétique, à la bactériologie ou aux réseaux informatiques, vont de pair avec les avancées scientifiques ; ensuite, la société est devenue plus intégrée et plus interdépendante, au niveau international autant que national ; enfin, les communications instantanées confèrent à un désastre, même localisé, des répercussions mondiales sur les attitudes et les comportements.

La menace planétaire la plus évidente aujourd'hui vient des musulmans intégristes, dont les valeurs et les croyances traditionnelles sont très éloignées de celles qui prévalent aux Etats-Unis et en Europe. D'autres causes et conflits, eux aussi rationnels et individuels, peuvent de même inspirer des actes fanatiques à des groupes sectaires ou à des individus isolés. Sans compter le danger potentiel que représentent les personnalités psychologiquement fragiles – dont le nombre pourrait augmenter aux Etats-Unis – si elles avaient accès aux progrès technologiques.

La techno-irrationalité

Selon certains optimistes, le fait d'avoir suivi des études scientifiques ou techniques réduit la propension à l'extrême irrationalité et à la délinquance. De nombreux contre-exemples existent pourtant et montrent ce qui peut au contraire arriver dans notre Occident technocratique. Certains membres de la petite secte « Heaven's Gate¹ », constitués en une « cellule » basée en Californie, vivaient en communauté fermée et gagnaient leur vie en créant des sites web sur Internet. Mais à leur savoir-faire technique et à leur curiosité non feinte vis-à-vis de la

technologie spatiale entre autres sciences, s'ajoutaient des croyances qui défiaient le raisonnement scientifique. Nombre de ses membres s'étaient en effet auto-castrés et proclamaient sur le site leur souhait de se transformer en « corps physique appartenant au vrai Royaume de Dieu – le Niveau d'Evolution supérieur à l'Humain – en abandonnant ce monde temporel et périssable au profit d'un monde durable et incorruptible ».

L'arrivée des êtres qui devaient les transporter jusqu'à ce niveau supérieur serait, disaient-ils, annoncée par une comète : « L'approche de la comète Hale-Bopp est le "signe" que nous attendons – l'arrivée du vaisseau spatial en provenance du Niveau supérieur à l'Humain qui nous y emmènera, nous rentrerons chez nous. Nous sommes heureux et prêts à quitter ce monde. » Quand ladite comète – l'une des plus brillantes des dix dernières années – fut très proche de la Terre, trente-neuf des membres de la secte, dont leur chef Marshall Applewhite, se suicidèrent après s'être méthodiquement purifiés.

Les suicides collectifs ne sont évidemment pas une nouveauté ; ils ont cours depuis près de deux mille ans et se perpétuent, même en Occident. En 1972, le révérend James Jones, chef d'une secte messianique retirée dans un coin perdu d'Amérique du Sud – « Jonestown », en Guyana – mit au point un suicide collectif au cours duquel les neuf cents adeptes de la secte moururent d'empoisonnement au cyanure. Paradoxalement, la technologie moderne permet à la fois de communiquer dans l'instant d'un point à l'autre du globe et de vivre entre soi dans un cocon intellectuel. La secte Heaven's Gate n'avait pas besoin de s'isoler dans la forêt amazonienne : économiquement autonomes grâce à Internet,

ses membres pouvaient éviter tout contact avec leurs voisins et avec toute personne « normale » en général, puisque leurs croyances se nourrissaient d'un contact électronique spécial avec les autres adeptes vivant ailleurs dans le monde.

Car Internet, qui permet en principe d'échanger des opinions et des informations à un niveau inédit, peut aussi réduire la compréhension et les échanges entre personnes en incitant certaines à rester enfermées dans une cybercommunauté d'affinités spirituelles. Pour Cass Susstein, professeur de droit à l'université de Chicago et auteur de *Republic.com*², Internet nous permet à tous de « filtrer » ce que nous y mettons, chacun pouvant ainsi lire un « moi quotidien » taillé sur mesure et, plus insidieusement, débarrassé d'idées susceptibles d'ébranler ses préjugés. Au lieu d'échanger avec ceux dont les attitudes et les goûts sont différents des leurs, de nombreux internautes pourront à l'avenir « vivre dans des pièces de résonance créées par eux-mêmes » et « n'auront pas besoin de se frotter à des problèmes et à des opinions qu'ils n'auront pas cherchés. On pourra ainsi et le plus facilement du monde voir exactement ce qu'on voudra, ni plus, ni moins. » Il est encore trop tôt pour prédire les conséquences de Internet sur la société en général et surtout à l'échelle internationale, mais on peut déjà entrevoir que ce phénomène risque d'encourager l'isolement et, si nous le voulons, nous permettre d'éviter plus facilement les contacts avec des avis contraires. Susstein fait aussi état des « groupes de polarisation », où les individus qui ne dialoguent qu'avec ceux qui partagent leurs idées, confortent leurs préjugés et leurs obsessions toujours plus rigides.

La croyance de la secte Heaven's Gate était un

mélange de principes « new age » et de science-fiction ; elle n'était pas la seule et il s'agit peut-être là d'une tendance résurgente. Les Raéliens, dont le siège est au Canada, comptent cinquante mille adeptes dans plus de quatre-vingts pays. Leur chef et fondateur, Claude Vorilhon, à l'origine un journaliste spécialisé dans les courses automobiles, déclara en 1973 avoir été kidnappé par des extraterrestres qui lui révélèrent la façon dont l'humanité avait été créée grâce à la « technologie de l'ADN ». Les Raéliens défendent un programme de clonage humain qui ne pose pas de problème au regard de l'éthique mais semble dangereusement prématuré, même aux yeux de ses défenseurs.

Ces sectes donnent l'impression d'être issues des mêmes « franges » que les tenants du complot selon lequel des OVNI nous observent. Mais aux Etats-Unis, des croyances tout aussi fantaisistes semblent quasiment faire partie de la société. Des millions de gens croient par exemple à l'« Extase » – jour où le Christ, revenu sur Terre, enlèvera les vrais croyants pour les emporter au paradis – ou au millénarisme imminent tel qu'il est décrit dans l'Apocalypse : l'avenir à long terme de la planète et de sa biosphère n'a aucune importance. Parmi les millénaristes figurent des personnalités influentes ; sous l'administration Reagan, l'environnement et la politique énergétiques furent confiés à James Watt, un fondamentaliste religieux, secrétaire aux Affaires intérieures. Selon lui, le monde parviendra à sa fin avant que les ressources pétrolières ne soient épuisées ou que nous ne subissions les conséquences d'un réchauffement planétaire et de la déforestation globale, de sorte qu'il nous incomberait quasiment de consommer jusqu'à la dernière des ressources terrestres³.

Comme les disciples de Heaven's Gate, certains adeptes de ces sectes ne menacent qu'eux-mêmes et il serait injuste de les diaboliser tous ou de faire l'amalgame de croyances n'ayant aucun point commun entre elles ; en outre, comparées aux idéologies classiques, ces sectes résurgentes sont encore marginales. Mais le prosélytisme d'exaltés religieux traditionnels allié, par exemple, au fanatisme pur et dur des défenseurs des droits des animaux britanniques et américains, peut mener à un mélange inquiétant, surtout s'il s'appuie sur des moyens technologiques pointus. Une poignée d'individus animés de ces croyances et capables de s'organiser et d'accéder à des savoir-faire techniques via Internet peut exercer un pouvoir énorme sur notre système socio-économique interconnecté et donc facilement à portée de main.

A supposer que l'on puisse maîtriser un événement subversif isolé, une série de plusieurs, dont l'impact psychologique serait amplifié par des reportages médiatiques toujours plus convaincants, finirait par être délétère. La prise de conscience de l'éventualité de tels événements donnerait lieu à une peur généralisée qui entraînerait, à l'échelle mondiale, le délitement des liens sociaux, déjà à l'œuvre dans les régions où sévit le terrorisme : on appréhende de prendre l'autobus de peur qu'un kamikaze lesté d'une bombe ne soit parmi les passagers, on hésite à aider un inconnu, et les plus riches se réfugient dans des communautés enclavées hautement sécurisées.

Ces préoccupations sont évidemment une raison de plus pour inspirer aux Etats et à la communauté internationale le désir d'atténuer les mécontentements et les injustices qui inspirent les redresseurs de torts. Mais,

comme les Etats-Unis en ont récemment fait l'expérience, le problème interne des sectes nihilistes ou apocalyptiques et des individus insatisfaits est de toute évidence un ennemi invisible.

La surveillance de la sphère privée est-elle la forme de sécurité la plus acceptable ?

Un moyen de pallier ces inquiétudes serait de confier notre sécurité aux nouvelles techniques, au prix du renoncement à toute vie privée. La surveillance universelle est en effet devenue possible et pourrait tout simplement devenir un outil de prévention des activités clandestines indésirables. Des méthodes comme l'implantation chirurgicale d'émetteurs sont déjà sérieusement envisagées, pour surveiller les prisonniers libérés sur parole, par exemple. La plupart d'entre nous n'apprécieraient pas d'être traités ainsi, mais peut-être finirions-nous par nous y résigner si l'insécurité augmentait ; et les prochaines générations n'y verraient rien à redire.

La surveillance de type totalitaire décrite dans l'œuvre de George Orwell serait carrément inacceptable, a fortiori si le degré d'intrusion augmentait au rythme des avancées techniques, à moins que les procédés de cryptage n'évoluent également. Supposons maintenant que cette surveillance soit à double sens, et que chacun de nous puisse « épier » non seulement le gouvernement mais le monde entier. Dans *The Transparent Society*⁴, l'auteur de science-fiction David Brin, se faisant peut-être un peu provocateur, suggère que la surveillance « symétrique » (et d'autant plus intrusive) soit la façon

la plus acceptable de nous garantir un avenir moins dangereux. Ceci impliquerait bien sûr un changement des mentalités, mais nous n'en sommes peut-être pas loin : les circuits fermés de télésurveillance dans les lieux publics sont courants en Grande-Bretagne et inspirent généralement confiance, bien qu'ils s'immiscent dans la vie privée. Une quantité croissante d'informations nous concernant personnellement sont déjà enregistrées sur les « cartes à puce » avec lesquelles nous réglons nos achats et chaque fois que nous nous servons d'un téléphone portable ; je suis, quant à moi, surpris du nombre de mes amis qui se confient sans hésiter sur leurs sites web, lisibles par le monde entier. Nous serions donc sans doute prêts à accepter une « société transparente » où les comportements déviants ne pourraient échapper à personne, plutôt que le contraire.

Ces scénarios futuristes échafaudés en Europe et en Amérique du Nord peuvent sembler superflus aux populations du reste du monde que la pauvreté prive des techniques de première nécessité. Mais cette transparence pourrait les atteindre, comme l'ont fait le téléphone portable et Internet.

Qu'en sera-t-il alors des relations entre pays riches et pays pauvres ? Comment la perception occidentale du reste du monde évoluera-t-elle lorsque les liens seront directs et non plus seulement ceux des films et des reportages télévisés⁵ ? On pourrait, en étant optimiste, imaginer que la preuve graphique en « temps réel » des besoins personnels des individus – ceux atteints du SIDA, par exemple, privés du dollar quotidien que coûtent les premiers soins – stimulera peut-être la générosité plus efficacement que les messages et les photos régulièrement adressés aux donateurs par les organismes

caritatifs. Mais il semble improbable, aux Etats-Unis, que les habitants des quartiers sécurisés, isolés des pauvres jusque dans leur propre voisinage, tendent la main aux peuples désespérés d'Afrique ; à supposer qu'ils puissent s'en faire des amis et avoir avec eux des contacts visuels, la compassion ferait rapidement long feu – autre exemple de la segmentation sociale croissante induite par le cybermonde.

Les peuples d'Afrique et d'Asie du Sud deviendront quant à eux encore plus conscients de ce dont ils sont privés, surtout si (comme c'est possible) l'accès au cyberspace leur coûte moins cher que les installations sanitaires de base, la nourriture et les soins. Moins passifs face aux pays riches, ils seront également plus au fait des moyens techniques susceptibles d'engendrer des conflits majeurs. Car le fondamentalisme religieux n'est pas seul à pouvoir déclencher la colère vis-à-vis de l'Occident : si l'ensemble des pays pauvres adoptait les soi-disant valeurs occidentales, ils seraient encore plus aigris face aux inégalités issues de la mondialisation, et à un système d'incitations économiques fournissant le superflu aux riches plutôt que les produits de première nécessité aux démunis.

Pouvons-nous rester humains ?

Depuis toujours, c'est la religion, l'idéologie, la culture, l'économie et la géopolitique qui façonnent les sociétés, et qui sont aussi, de par leur immense diversité, prétextes aux conflits internes et aux guerres. L'être humain demeure le seul élément inchangé au cours des siècles. Mais au XXI^e siècle, les drogues, la modification

génétique et peut-être les implantations de silicone dans le cerveau transformeront les mentalités, les comportements et jusqu'à l'apparence physique des humains.

Bien que les transformations génétiques soient beaucoup plus rapides que toutes les mutations survenues par évolution naturelle, il faudra attendre plusieurs générations avant qu'elles n'aient lieu. Mais les altérations de l'humeur et des mentalités pourraient, quant à elles, s'étendre à des populations entières du fait de la dépendance à certaines drogues et, qui sait, des implants électroniques.

Dans *La Fin de l'homme : les conséquences de la révolution biotechnique*⁶, Francis Fukuyama remarque que l'usage régulier et généralisé des médicaments qui altèrent l'humeur peut réduire et appauvrir le potentiel du caractère humain. Selon lui, le Prozac pris comme antidépresseur et la Ritaline, qui atténue l'hyperactivité des enfants agités mais en parfaite santé, sont déjà en train de réduire les types de personnalités considérées comme normales. Selon Fukuyama, ce phénomène va encore s'accroître avec l'apparition de nouvelles drogues susceptibles de menacer ce qu'il considère comme l'essence de l'être humain.

De fait, l'injection d'hormones agissant directement sur le cerveau pourra bientôt provoquer des changements de personnalité bien plus importants et « ciblés » que le Prozac et autres produits de même type. L'hormone PYY 3-36, qui élimine la sensation de faim en agissant directement sur l'hypothalamus, inspire des inquiétudes à Steve Bloom, l'un des spécialistes de cette technique au Hammersmith Hospital de Londres, au sujet des conséquences possibles d'ici dix ans : « Si l'on peut modifier le désir de nourriture, on pourra également transformer

d'autres désirs profonds de l'être humain, l'hypothalamus étant le centre de circuits cérébraux qui commandent le désir et l'orientation sexuels⁷. »

Fukuyama craint que l'usage généralisé des drogues réduise l'intensité des humeurs et des comportements et que notre espèce dégénère en zombies acquiesçant à tout ; la société deviendrait alors une contre-utopie semblable au *Meilleur des mondes* d'Aldous Huxley : sans changer d'apparence, nous cesserions d'être vivants. Fukuyama prône un contrôle strict de toutes les drogues altérant le cerveau ; les interdictions n'auraient pas besoin d'être respectées à cent pour cent mais tiendraient à distance les personnalités extrêmes ; et si, enfreignant la loi, quelques délinquants se procuraient illégalement des drogues, les conséquences sur le caractère d'un pays seraient négligeables.

Mon inquiétude est à l'opposé de celle de Fukuyama. La « nature humaine » est faite d'une immense variété de personnalités, y compris celles qui sont attirées par les franges de mécontents. Or, l'influence déstabilisante et délétère d'un petit nombre de ces personnes deviendra d'autant plus puissante que leur pouvoir et leur savoir-faire techniques augmenteront et que le monde deviendra plus interconnecté.

Il y a trente ans, le psychologue B.F. Skinner prédisait, dans son ouvrage *Beyond Freedom and Dignity*⁸ qu'une certaine forme de contrôle de l'esprit pouvait être nécessaire pour éviter une panne de la société ; selon lui, le « conditionnement » de l'ensemble de la population est indispensable là où les individus sont heureux et que où personne ne souhaite les déstabiliser.

Skinner était un comportementaliste, et ses théories fondées sur le mécanisme de « stimulation-réaction »

sont aujourd'hui discréditées. Mais le problème qu'il soulevait est aujourd'hui d'actualité, car les avancées scientifiques permettent à un seul individu à personnalité « aberrante » de provoquer une catastrophe généralisée. Si un psychologue avait actuellement le courage de proposer une panacée, celle-ci ressemblerait ironiquement au cauchemar de Fukuyama : une population rendue docile et obéissante par des drogues ciblées et des interventions génétiques destinées à « corriger » les personnalités extrêmes. Les futures sciences du cerveau pourront peut-être même – perspective encore plus contre-utopique – « modifier » la personnalité d'individus susceptibles de devenir de dangereux mécontents.

Dans le roman fantastique de Philip K. Dick *Minority Report*⁹, dont Steven Spielberg a tiré un film, les êtres humains « pré-cognitifs », mentalement anormaux et spécialement conçus pour cela, sont capables d'identifier les futurs criminels potentiels, qui sont alors traqués et emprisonnés dans des cuves. Si nos intentions étaient effectivement déterminées génétiquement et physiologiquement (nous ignorons encore dans quelle mesure c'est le cas), l'identification de criminels potentiels pourrait bientôt dépasser les pouvoirs psychiques. La tentation serait alors plus forte d'instituer ce type d'actions préventives dans le monde réel afin de nous protéger d'éventuels actes criminels – de plus en plus graves à mesure que les techniques progressent – commis par un délinquant isolé.

Notre civilisation, remarque Stewart Brand, est « de plus en plus imbriquée et poussée au-dessus de l'abîme d'une superstructure technologique hautement sophistiquée dont chacune des parties dépend de toutes les autres¹⁰ ». Son essence peut-elle être sauvegardée sans que l'humanité doive y sacrifier sa diversité et son

individualité ? Devons-nous, pour survivre, être assujettis par un Etat policier, privés de toute vie intime ou calmés jusqu'à la passivité ?

Ou pourrait-on réduire les risques en freinant l'avancée de sciences et de technologies potentiellement dangereuses, ou bien même abandonner complètement certains domaines de la recherche scientifique ?

Faut-il freiner la science ?

Les sciences du xx^e siècle ouvrent de belles perspectives mais ne présentent pas que des avantages. Les contraintes éthiques sur la recherche ou l'abandon de technologies potentiellement dangereuses sont difficiles à accepter et encore plus à mettre en œuvre.

En 2002, le magazine *Wired*, mensuel de luxe spécialisé dans le matériel informatique et les gadgets électroniques, a eu l'idée d'ouvrir une série de « paris à long terme¹ », afin de débattre des évolutions de la société, de la science et de la technologie. Esther Dyson, gourou de l'univers Internet, a ainsi prédit que la Russie serait dans dix ans le premier fabricant mondial de logiciels ; des physiciens ont non seulement misé sur le temps qu'il faudrait pour établir une théorie unifiée des forces fondamentales mais aussi sur l'existence même

de cette théorie² ; d'autres ont avancé qu'un être humain a aujourd'hui des chances de vivre jusqu'à l'âge de cent cinquante ans – ce qui n'est pas impossible étant donné le rythme auquel progresse la médecine mais constitue un pari étrange dans la mesure où ses auteurs ne seront plus là pour constater ou non sa réalité³.

J'ai quant à moi parié mille dollars que « d'ici 2020, une bio-erreur ou une bio-terreur aura causé un million de morts ». J'espère ardemment, bien sûr, perdre mon pari, mais, honnêtement, je ne crois pas que ce sera le cas. L'horizon étant inférieur à vingt ans, je pense que ce risque est important, à supposer même que l'on « gèle » les programmes de recherches, ou que les auteurs potentiels de telles horreurs ne disposent que des techniques d'aujourd'hui. Car rien n'avance plus vite que la biotechnologie, et ses progrès vont intensifier et multiplier les risques.

Il est surprenant que la communauté scientifique soit si discrète au sujet de ces craintes. La plupart des experts pensent en fait que le meilleur moyen d'affronter les aléas inhérents aux avantages colossaux des nouvelles technologies est d'acquérir encore plus de technologie, ou de cibler celle-ci différemment, et leurs préoccupations portent plutôt sur ce dont nous serions privés si nous n'allions pas de l'avant. A ses débuts, la maîtrise de la vapeur a coûté la vie dans des conditions atroces à des centaines de personnes lors de l'explosion de chaudières rudimentaires ; il en fut de même à l'aube de l'aviation, et la plupart des interventions chirurgicales, tenues pour acquises aujourd'hui, s'avéraient parfois mortelles lors de leurs premières tentatives. Tout progrès procède de « tâtonnements », mais si le risque est volontairement accepté, et que le résultat en vaut la peine

(comme en chirurgie), le seuil de tolérance peut être repoussé. C'est ce qu'illustre a contrario Freeman Dyson dans un essai intitulé « The Hidden Cost of Saying No⁴ », où il note que la recherche et le développement de nouveaux médicaments sont entravés – parfois au détriment de ceux auxquels ils pourraient sauver la vie – par la durée et le coût des essais requis avant l'autorisation de mise sur le marché.

Mais lorsqu'il s'agit d'un « scénario catastrophe », ou quand un risque ne peut être évalué, il en va autrement pour les individus qui y sont exposés et qui n'ont rien à y gagner. Certains scientifiques sont fatalistes au sujet des risques ; selon d'autres, plus optimistes, voire complaisants, plus le risque est grand plus le « pire » peut être évité – perception qui peut sembler un peu déplacée. On peut en revanche se demander si éviter de prendre des risques incontrôlables ne revient pas à « freiner » la recherche dans tels ou tels secteurs, ou à sacrifier certaines des ouvertures traditionnelles de la science.

Quasiment chaque découverte susceptible d'engendrer une application positive peut en effet comporter aussi un versant pernicieux, et les avancées biologiques débouchent aujourd'hui sur un nombre croissant de pratiques potentielles – clonage humain, organismes génétiquement modifiés, etc. – qui devront être réglementées. Mais les chercheurs acceptent que leurs méthodes de travail et l'application de leurs découvertes fassent l'objet de contrôles ; aucun scientifique responsable ne ferait siennes les paroles du monstrueux docteur Moreau de H.G. Wells : « J'ai continué mes recherches dans la voie où elles m'ont mené. C'est la seule façon que je sache de conduire des recherches. Je pose une question,

invente quelque méthode d'avoir une réponse et j'obtiens... une nouvelle question. (...) La chose que vous avez devant vous n'est plus un animal, une créature comme vous, mais un problème. (...) Je voulais (...) trouver la limite extrême de plasticité dans une forme vivante⁵. »

La retenue scientifique

La modération en matière de recherche se justifie évidemment si les expériences elles-mêmes présentent un risque comme, par exemple, celui de provoquer des concentrations extrêmes d'énergie, ou de créer de dangereux agents pathogènes. Dans certains secteurs de recherche, les scientifiques s'imposent donc des moratoires. Il y eut jurisprudence en 1975 lorsque d'éminents spécialistes en biologie moléculaire s'interdirent⁶ certains types d'expérimentations rendues possibles par la technique, nouvelle à l'époque, de l'ADN recombinant. Cette déclaration vint à la suite d'une rencontre organisée à Asilomar, en Californie, à l'initiative de Paul Berg de l'université de Stanford. Sans être déraisonnable – le niveau de risque était alors véritablement préoccupant –, le moratoire d'Asilomar ne tarda pas à paraître exagérément préventif et, avec le temps, James Watson, co-découvreur de la double hélice de l'ADN, considère cette tentative d'auto-réglementation comme une erreur. (Généralement « fonceur » quant aux applications de la biotechnologie, Watson pense que nous devrions être moins timorés face à l'utilisation des découvertes génétiques. « Si les biologistes refusent d'être démiurges, qui le sera ? » demande-t-il non sans arrogance.) David

Baltimore, autre participant de cette conférence, demeure, quant à lui, satisfait de cette initiative ; il fallait, dit-il, « encourager la société à réfléchir à ces problèmes ; si nous ne l'incitons pas à en débattre, elle peut freiner l'exploitation de nos travaux. »

Le moratoire d'Asilomar était encourageant en ce qu'il prouvait qu'un groupe d'éminents chercheurs de tous pays pouvaient être d'accord sur un principe d'auto-retenue⁷, et qu'ils en imposaient suffisamment au sein de la communauté scientifique pour que ce texte soit appliqué. Aujourd'hui, les motifs de prudence ont encore doublé mais un consensus volontaire semble encore plus improbable : la communauté scientifique est infiniment plus nombreuse et la concurrence, accrue par les pressions commerciales, plus intensive.

Dans beaucoup de pays, les expérimentations sur les animaux sont officiellement réglementées pour des raisons humanitaires, et un certain nombre d'entre elles, pourtant ni cruelles ni dangereuses, font même l'objet de directives extrêmement strictes.

Les autorités bioéthiques utilisent le terme de « facteur de dégoût » pour désigner la réaction émotionnelle qu'inspire la violation de « l'ordre naturel ». Cette réaction ne reflète parfois qu'un conservatisme irréfléchi en voie de disparition : à leurs débuts, les transplantations de reins et même de cornées provoquèrent ce genre de réactions, et sont acceptées aujourd'hui. Il arrive également que les réticences soient excessives, comme lorsque les journaux publièrent les photos d'une souris à laquelle on avait implanté un support où de la peau poussait sous forme d'une oreille humaine presque aussi grande que le corps de l'animal : celui-ci ne souffrait pas et n'avait que faire de son aspect.

J'ai moi-même un certain dégoût face aux expériences invasives destinées à modifier les comportements animaux. Des physiologistes du centre médical de Brooklyn, de l'université de New York, implantèrent par exemple des électrodes dans le cerveau de rats. L'une d'elles stimulait le « centre du plaisir », deux autres activaient les régions qui contrôlent les moustaches ; ceci transformait les animaux en « robots-rats » dirigés latéralement et forcés de se comporter de façon absolument contraire à l'instinct. Ces expériences ne sont pas forcément cruelles envers les rats, et en un sens, elles diffèrent peu de la façon dont un cheval ou un bœuf est harnaché ou dirigé, mais elles préfigurent peut-être des modifications intrusives de ce que beaucoup considèrent comme la nature intrinsèque des humains et des animaux ; les techniques hormonales sophistiquées modifiant le processus de la pensée inspireront la même réaction.

Ce dégoût excessif face aux expériences sur les rats et les souris peut être le fait d'une minorité, mais certaines expériences à venir pourraient bientôt provoquer des levées de bouclier rédhitoires. Comme la « création » d'animaux inanimés perçus comme des légumes et que l'on pourrait traiter de façon atroce sans aucun état d'âme (l'industrie alimentaire cesserait ainsi d'être accusée de cruauté envers les animaux élevés en batterie). Plus grave encore sur le plan éthique serait la création d'hominoïdes décérébrés aux organes considérés comme des pièces détachées. En revanche, les transplantations d'organes animaux sur les humains ne devraient pas soulever plus de protestations que la consommation de la viande – encore que cette technique (la xénotransplantation) puisse être interdite, non pour

des raisons morales mais parce que de nouvelles maladies animales pourraient contaminer l'homme. A cet égard, l'utilisation de cellules de tiges végétales permettant à un organe de substitution de pousser *in situ* semblerait de loin la méthode de remplacement la plus acceptable en matière de transplantation chirurgicale, alors que celle-ci contraint aujourd'hui à l'attente, dans un mélange ambigu d'angoisse et d'impatience, qu'un accident de la route ou un malheur cause la mort d'un « donneur » compatible.

Quant au clonage, il sera peut-être bientôt banalisé pour ce qui est des animaux, mais les tentatives sur l'homme inspirent une réaction de dégoût unanime. La raison voudrait que les chercheurs s'y opposent à cause du risque d'horribles anomalies du nouveau-né. Pourtant, la naissance du premier humain cloné n'est peut-être qu'une question d'années, comme le laissent craindre les rumeurs selon lesquelles la secte des Raéliens posséderait déjà des centaines d'embryons clonés.

Les choix dictant les applications scientifiques, en matière de médecine, d'environnement, etc., doivent faire l'objet de débats bien au-delà de la communauté scientifique⁸ mais donner la place à des opinions dépassionnées indifférentes aux unes tapageuses des tabloïdes. C'est pourquoi le public devrait acquérir un minimum de notions scientifiques et savoir au moins faire la différence entre un proton et une protéine ! Notons l'une des particularités louables du projet de génome humain : son financement public est en partie destiné à la discussion et à l'analyse des conséquences morales et sociales de ce programme.

Le financement de la science

La recherche scientifique et les motifs que nous avons de la poursuivre ne peuvent être séparés de leur contexte social, car si la science est le soubassement de la société moderne, les comportements humains déterminent en contrepartie les choix scientifiques et les programmes susceptibles de séduire les gouvernements ou les industriels.

Pour le seul domaine scientifique, dans lequel je suis moi-même impliqué, plusieurs exemples illustrent ce propos. D'énormes machines destinées à l'étude des particules subatomiques furent en partie financées par l'Etat parce que les programmes étaient dirigés par des physiciens devenus célèbres pendant la Seconde Guerre mondiale ; les détecteurs utilisés par les astronomes pour déceler les faibles émissions en provenance d'étoiles et de planètes lointaines, et désormais intégrés dans les appareils photo numériques⁹, ont d'abord été conçus pour permettre à l'armée américaine de discerner les Vietnamiens dans la jungle ; et les projets spatiaux coûteux – comme les sondes ayant atterri sur Mars et donné des photos rapprochées de Jupiter et de Saturne – vont de pair avec un énorme programme spatial initialement mû par la rivalité entre superpuissances pendant la guerre froide ; quant au télescope spatial Hubble, il aurait coûté encore plus cher si sa fabrication n'avait pas été en partie financée en même temps que celle des satellites espions... Et la liste serait aussi longue dans d'autres domaines scientifiques.

Ce type d'aides financières extérieures au monde scientifique freine l'optimisation des travaux de recherche : c'est apparemment le cas, d'un point de vue

purement intellectuel aussi bien que matériel. Certains programmes empruntent la « voie royale » et obtiennent des financements faramineux ; d'autres, comme les recherches liées à l'environnement, aux énergies renouvelables et à la biodiversité semblent laissés pour compte. Dans le secteur médical, par exemple, les faveurs vont à la recherche sur les maladies comme le cancer ou les problèmes cardiovasculaires, qui frappent surtout les pays riches, alors que les pays du tiers-monde souffrent de maladies infectieuses endémiques.

La plupart des chercheurs considèrent cependant que les connaissances valent d'être acquises pour elles-mêmes, et qu'à condition de ne pas présenter de danger ni d'enfreindre l'éthique, la recherche « pure » ne doit pas être limitée. Mais n'est-ce pas un peu réducteur ? Ne devrait-on pas se demander si, à cause du malaise qu'ils provoquent, certains secteurs de recherche – comme ceux des laboratoires universitaires – ne devraient pas être freinés par le grand public ? La meilleure façon de se protéger contre un nouveau danger pourrait être d'interdire au monde les connaissances scientifiques de base sur lesquelles il repose.

Dans tous les pays, ce sont les secteurs scientifiques à fortes retombées potentielles qui obtiennent des aides financières importantes, et ce pour des raisons stratégiques ; la préférence va par exemple à la biologie moléculaire plutôt qu'à l'étude des trous noirs (je travaille sur ces derniers mais ne considère pas pour autant ce choix comme injuste). Mais la réciproque est-elle valable : la recherche pure, quel que soit son intérêt évident, doit-elle être privée de soutien financier sous prétexte que les recherches risquent d'être dévoyées ? Je crois que oui, surtout depuis que l'allocation de l'aide

financière aux différents secteurs dépend de « tensions » complexes entre des facteurs extérieurs à la science. Bien sûr, on n'empêchera jamais complètement un chercheur de réfléchir et de spéculer, puisque ses meilleures intuitions lui viennent spontanément, dans ses moments de loisir ; mais tout chercheur auquel on a supprimé sa bourse sait combien cela peut ralentir sa recherche.

Les recherches qui promettent des retombées lucratives à court terme n'ont pas besoin de l'aide publique, car les entreprises sont mises à contribution, et dans ce cas, seule une décision gouvernementale peut mettre fin à la recherche. Cette contrainte s'applique aussi aux bienfaiteurs privés, de riches individus pouvant détourner une recherche dans leur propre intérêt – tel cet Américain fortuné qui donna cinq millions de dollars à l'université texane A & M pour la recherche sur le clonage parce qu'il voulait cloner son vieux chien¹⁰ ...

Pour qu'un champ de recherche soit efficacement freiné, le consensus doit être international ; si un pays impose une réglementation, les chercheurs et les entreprises les plus dynamiques peuvent toujours aller s'installer ailleurs, dans des pays moins strictement réglementés. C'est déjà le cas en matière de recherche cellulaire végétale, certains pays, comme le Royaume-Uni et le Danemark, aux lois relativement permissives attirant les « cerveaux ». Et d'autres, comme Singapour et la Chine, cherchent à les concurrencer en offrant des conditions encore plus attrayantes à leur industrie biotechnologique naissante et aux chercheurs.

Les retombées d'envergure d'une politique dirigiste en matière scientifique sont imprévisibles. Comme je l'ai noté au début de cet ouvrage, la découverte des rayons X fut le fruit du hasard et non le résultat d'un programme

médical intensif destiné à voir à travers la peau. Autre exemple : au XIX^e siècle, un projet visant à améliorer la reproduction de la musique, qui devait mener à la création d'un orchestrion à la mécanique complexe, ne nous aurait pas appris grand-chose sur les techniques utilisées de fait au XX^e siècle ; c'est à la curiosité de Michael Faraday et ses successeurs et à leurs recherches sur l'électricité et le magnétisme que nous le devons. Plus récemment, les pionniers du laser ignoraient la façon dont leur invention serait utilisée – et ils étaient certainement loin d'imaginer qu'une de ses premières utilisations serait de recoudre les rétines décollées.

Lors d'une découverte, il faudrait se demander si son application potentielle effraie au point de se l'interdire, ou du moins de s'imposer des limites. La nanotechnologie, par exemple, pourrait faire avancer la médecine, l'informatique, la surveillance, entre autres domaines pratiques, mais aussi donner naissance à un répliqueur et aux dangers qu'il comporte ; le risque serait alors, comme c'est le cas aujourd'hui en technologie, de « déclencher » une catastrophe, ou que la technique soit utilisée comme une arme « suicidaire » ; la seule parade possible consisterait en un système immunitaire de type nanotechnique. Pour se protéger de ce genre d'aléas, Robert Freitas propose la signature d'un moratoire comme celui d'Asilomar, aux termes duquel l'étude de la vie artificielle se ferait sur ordinateur et non sur des machines « réelles », et interdisant la fabrication de nanomachines capables de se reproduire dans un environnement naturel. On pourrait prendre les mêmes précautions concernant les réseaux informatiques hyper intelligents, entre autres extrapolations de la technologie actuelle.

Secret ou transparence ?

Et si, au lieu de vouloir freiner les avancées d'un domaine de recherche, on en limitait les risques en interdisant l'utilisation des nouvelles connaissances à ceux qui pourraient en faire mauvais usage ? Les travaux liés à la défense nationale sont depuis toujours tenus secrets par les gouvernements, mais la recherche qui n'est pas classée secrète (ni confidentielle, pour des raisons commerciales) est accessible à tout un chacun. En 2002, le gouvernement américain proposa ainsi que les scientifiques eux-mêmes limitent la diffusion des nouvelles recherches qui, bien que non classées secrètes, sont sensibles et risquées ; cette mesure constituait une telle rupture avec la tradition de liberté qu'elle donna lieu à une controverse non seulement parmi les scientifiques américains mais dans le pays tout entier.

Que peut faire une université si un étudiant apparemment qualifié et titulaire d'une bourse appréciable mais de provenance douteuse souhaite obtenir un doctorat en ingénierie nucléaire ou en microbiologie ? Tenter de faire obstacle à la formation de délinquants potentiels peut, tout au plus, retarder un peu la diffusion de nouvelles idées, surtout depuis que les individus « à haut risque » ne peuvent être identifiés avec certitude. Certains considèrent peut-être que tout ce qui constitue un frein, même négligeable, vaut la peine ; pour d'autres, le savoir-faire étant de toutes façons diffusé, il serait peut-être plus efficace que l'université entretienne son réseau d'anciens étudiants : un projet suspect aurait ainsi moins de chances de passer inaperçu grâce aux fuites échan-

gées. La tenue au secret de projets clandestins serait en effet rendue moins facile dans un contexte d'ouverture des frontières et des échanges entre étudiants et chercheurs. Les migrations internationales sont en pratique réglementées par la délivrance de visas d'entrée, mais si les universités avaient leur mot à dire, je crois que la plupart se montreraient ouvertes vis-à-vis des étudiants étrangers¹¹, quitte à être plus regardantes quant à l'entrée dans le pays de chercheurs plus expérimentés.

Une des mesures en cours de discussion – et fortement préconisée par Matthew Meselson, enseignant à Harvard et sommité en matière d'armes biologiques – serait d'une part la signature d'un accord international semblable à celui déjà appliqué aux pirates aériens, permettant d'arrêter et de juger toute personne, où qu'elle soit, qui tente d'obtenir ou qui détient des agents pathogènes dangereux, et d'autre part, d'inculquer aux sociétés le principe de dénonciation.

Les chercheurs étant à la fois auteurs et critiques de leurs propres travaux, toute nouvelle découverte doit faire l'objet d'un « contrôle de qualité par les pairs » avant publication dans les supports de presse des universités, pour éviter les annonces intempestives ou outrancières. Cette procédure de principe est cependant de plus en plus souvent contournée du fait des pressions commerciales ou parfois simplement de la forte rivalité entre universités. Les découvertes dignes de publication font ainsi grand bruit grâce aux dépêches de presse ou aux conférences, avant d'avoir été vérifiées, tandis que d'autres demeurent confidentielles pour des raisons commerciales. Et les chercheurs eux-mêmes sont face à un dilemme lorsqu'ils entreprennent des recherches « sensibles », comme les virus mortels.

Une infraction des plus notoires aux normes scientifiques a eu lieu en 1989, lorsque Stanley Pons et Martin Fleischmann, qui travaillaient à l'université de l'Utah, déclarèrent avoir obtenu de l'énergie nucléaire à température ambiante en utilisant du matériel de laboratoire classique. Si elle avait été crédible, cette annonce aurait mérité tout son écho et aurait figuré parmi les grandes découvertes du siècle, aussi importante que celle du feu, car la « fusion à froid » nous aurait offert des ressources illimitées et bon marché en énergie propre.

Mais, très vite, des doutes d'ordre technique surgirent. Les annonces d'envergure exigent des preuves à leur mesure et, dans ce cas précis, c'était loin d'être le cas. Des incohérences furent décelées dans les exposés de Pons et Fleischmann et des expérimentateurs de plusieurs autres laboratoires tentèrent en vain de reproduire le phénomène. La plupart des scientifiques s'étaient montrés sceptiques dès le début et, en l'espace d'un an, il fut unanimement convenu que les résultats de l'expérience avaient été mal interprétés, même si certains « y croient » encore aujourd'hui¹².

Un épisode similaire advint en 2002, mais il fut mieux géré. Un groupe de chercheurs dirigé par Rusi Taleyarkhan, du laboratoire national de Oak Ridge, travaillait sur le curieux effet appelé « sonoluminescence » : des ondes sonores intenses passent à travers un liquide pétillant, les bulles sont alors compressées et émettent des éclairs lumineux. Les chercheurs de Oak Ridge prétendirent avoir écrasé les bulles grâce à une technique astucieuse : à température très élevée, elles atteignaient une chaleur suffisante pour déclencher une fusion nucléaire, une version infiniment miniaturisée du processus qui permet au Soleil de briller et qui génère

l'énergie d'une bombe à hydrogène. Leurs collègues de Oak Ridge eux-mêmes n'y crurent pas : cette annonce ne violait pas les « précieuses croyances » autant que la fusion à froid mais elle ne semblait pas plausible. Taleyarkhan soumit néanmoins un article au prestigieux magazine *Science* qui, malgré le scepticisme des pairs de l'auteur, décida de le publier ; il avertit néanmoins ses lecteurs de la controverse, l'annonce était donc encadrée au maximum¹³.

Le fiasco de la « fusion à froid » n'eut pas de conséquence néfaste à long terme et seules les réputations de Pons, Fleischmann et de ceux qui les avaient crus aveuglément en pâtirent. Quant à la validité de l'annonce de Taleyarkhan, il en sera décidé bientôt après des débats et les reproductions de son expérience par des chercheurs indépendants. Cette histoire prouve qu'à condition d'être faite en toute transparence¹⁴, l'annonce d'une découverte peut-être majeure éveille systématiquement l'intérêt de la communauté scientifique mondiale et l'infraction de la vérification des pairs ne porte pas à conséquence.

Mais supposons qu'une annonce aussi incroyable que celle de Pons et Fleischmann ait émané de chercheurs expérimentés au sein d'un laboratoire poursuivant des recherches secrètes à objectifs militaires ou commerciaux. Que serait-il arrivé ? Le grand public n'en aurait très probablement pas eu connaissance, car une fois l'importance économique et stratégique de cette découverte sans précédent validée par les autorités, un programme de recherche d'envergure aurait été entrepris, consommant des sommes faramineuses à l'insu de tout le monde.

Un événement comparable s'est produit dans les années 1980. Le Livermore Laboratory – l'un des deux

géants américains en matière de fabrication d'armes atomiques – poursuivait un programme secret d'envergure destiné à produire des lasers X. Ces travaux étaient en partie financés par l'Initiative de défense stratégique – la « Guerre des étoiles » – du Président Reagan. Il s'agissait de provoquer des rayons lasers dans l'espace grâce à une explosion nucléaire ; une micro-seconde avant d'être atomisé, le dispositif était censé envoyer des « rayons mortels » intenses capables de détruire des missiles ennemis à l'attaque. La plupart des chercheurs indépendants n'avaient que mépris pour ce projet, mais ses inventeurs étaient Edward Teller et ses protégés, qui travaillaient dans un environnement « fermé » et accédaient aux vastes ressources du Pentagone : ils dépensèrent littéralement des milliards de dollars dans ce programme de « lasers X », qui avorta. Mais si l'un des chercheurs de Teller était parvenu à découvrir une nouvelle source d'énergie, on imagine aisément les négociations qui auraient eu lieu dans le plus grand secret, pour convaincre de l'intérêt national d'un « programme intensif ». Dans un cas comme celui-ci, le secret mène au gaspillage d'argent et d'efforts. Et que dire d'un projet clandestin et risqué, que la plupart des chercheurs extérieurs tenteraient d'arrêter mais qui serait ignoré ou minimisé par les scientifiques impliqués dans le projet ?

« Renoncement finement ajusté »

Bill Joy, co-fondateur de Sun Microsystems et inventeur du langage informatique Java, est un de ceux qui militent en faveur d'un « ralentissement » de la recherche scientifique. Son article intitulé « Pourquoi

l'avenir n'a pas besoin de nous¹⁵ », témoigne d'une inquiétude sincère, surprenante de la part de cette figure de la cybertechnologie. Publié en 2002 – par *Wired*, qui plus est –, ce texte fit beaucoup de bruit et, dans un éditorial, le *Times* de Londres l'assimila au célèbre memorandum de 1940 des physiciens Robert Frisch et Rudolph Peierls, par lequel ces derniers attiraient l'attention des autorités britanniques sur la faisabilité de la bombe atomique.

Plutôt que de craindre les conséquences de la génétique et de la biotechnologie au cours des dix prochaines années – application à mauvais escient de la génomique, risque de bio terreur par des individus isolés, etc., – Joy se préoccupe des risques à plus long terme posés par les technologies fondées sur la physique et, en particulier, des conséquences incontrôlables d'un potentiel des ordinateurs et des robots supérieur à celui des humains. Il craint en effet avant tout que la génétique, la nanotechnologie et la robotique (les technologies GNR) n'évoluent sans contrôle et ne « nous dépassent ».

La solution qu'il propose est de « renoncer » aux recherches et aux développements susceptibles d'engendrer ces dangers : « Si, en tant qu'espèce, nous pouvions nous mettre d'accord sur ce que nous voulons et où nous allons, et pourquoi, alors nous rendrions notre avenir moins dangereux, alors nous comprendrions ce à quoi nous pouvons et devons renoncer. Dans le cas contraire, il est facile d'imaginer une course aux armements dépassant les technologies GNR, comme ce fut le cas avec les technologies [nucléaires] au cours du xx^e siècle. Ceci est peut-être le risque majeur, car à partir du moment où elle commence, elle est très difficile à arrêter. Cette fois-ci – contrairement à ce qui s'est passé du temps du Projet

Manhattan –, nous ne sommes pas en guerre, aucun ennemi ne menace notre civilisation ; seuls nous poussent nos habitudes, nos désirs, notre système économique, et notre besoin de savoir mû par l'esprit de compétition. »

Comme Joy ne l'ignore pas, il est déjà difficile pour une seule personne raisonnable d'entrevoir la limite en matière de recherche ; il le serait encore plus de parvenir à un consensus aux termes duquel on abandonnerait l'une d'elles en raison du danger extrême qu'elle présente : nous sommes rarement capables « en tant qu'espèce, de nous mettre d'accord », même pour les choses urgentes... Alors, le renoncement peut-il être assez « finement ajusté » pour que soit faite la distinction entre projets inoffensifs et projets dangereux ? Les techniques et découvertes novatrices ont généralement une utilité à court terme évidente, mais elles nous mènent aussi vers le cauchemar à long terme dont parle Joy. Les procédés susceptibles d'engendrer des « nanorobots » voraces pourraient aussi servir à créer des vaccins contre eux.

A supposer que toutes les universités du monde admettent le caractère dangereux de certains domaines de recherche et que tous les pays en imposent l'interdiction formelle, quelle en serait l'efficacité ? Un moratoire universel pourrait au moins freiner telles lignes de recherche incontournables – mieux vaut une interdiction partiellement respectée que pas d'interdiction du tout. Quant aux recherches très risquées, leur interdiction doit être respectée à près de cent pour cent pour rassurer vraiment, étant donné les conséquences dévastatrices, par exemple, d'une seule fuite de virus mortel. Mais en matière de bio erreur et de bio terreur, le danger est désormais là et il serait irréaliste d'espérer jamais être

totale en sécurité. Des risques subsisteront toujours, sauf à instaurer des mesures elles-mêmes indésirables, comme la surveillance électronique de la vie privée.

Joy souhaiterait retarder le jour où nous serons dépassés par des robots hyper intelligents, ou celui de la désintégration de la biosphère en « masse grise et visqueuse ». Mon pessimisme porte sur un avenir plus proche que le sien, et en un sens, il va plus loin. Je crains en effet qu'avant l'avènement de tels phénomènes futuristes, la société ne subisse un choc effroyable dû à une application dévoyée de la technologie, existante ou à venir au cours des deux prochaines décennies. Paradoxalement, si ces craintes se réalisaient, la seule satisfaction serait que la technologie de pointe nécessaire aux nanomachines et aux ordinateurs super humains régresserait peut-être irréversiblement – nous épargnant ainsi les scénarios échafaudés par Bill Joy.

Les risques de catastrophes naturelles

Le risque d'impact d'astéroïde géant est plus élevé que celui des accidents d'avions, mais aucune catastrophe naturelle n'est aussi préoccupante que les menaces croissantes d'origine humaine.

En juillet 1994, nous fûmes des millions à observer, grâce à Internet, les vues télescopiques d'« éclaboussures » incroyables et inédites à nos yeux : des fragments d'une grosse planète s'écrasant sur Jupiter. Chacune de ces taches noires plus grandes que la Terre était la « cicatrice » d'un impact massif et resta visible sur la surface de Jupiter pendant les semaines qui suivirent. La comète Shoemaker-Levy¹ qui volait ainsi en éclats était sous observation depuis un an car elle était en train de se fragmenter en une vingtaine de morceaux. Estimant que Jupiter était dans la ligne de mire de leurs trajectoires,

les astronomes s'étaient préparés à observer l'impact à l'heure prévue.

Cet événement mit au jour la vulnérabilité de notre planète face à de tels impacts. Si la Terre est plus petite que la cible géante qu'est Jupiter, les comètes et les astéroïdes s'en approchent néanmoins assez pour constituer un danger. Il y a environ soixante-cinq millions d'années, la Terre fut frappée par un objet de près de dix kilomètres de diamètre dont l'impact dégagait autant d'énergie qu'un million de bombes H et provoqua des raz-de-marée et des séismes qui ébranlèrent les montagnes de par le globe ; les roches détritiques projetées dans l'atmosphère supérieure furent telles qu'elles cachèrent le Soleil pendant plus d'un an ; ce choc est vraisemblablement la cause de la disparition des dinosaures. La Terre en garde encore la trace : cet impact exceptionnel est à l'origine du cratère de Chicxulub dans le golfe du Mexique, qui mesure près de deux cents kilomètres de diamètre.

Les comètes et les astéroïdes sont deux types différents d'objets « suspects » tournant à toute vitesse autour de notre système solaire. Les comètes, principalement constituées de glace et de gaz froids comme l'ammoniaque et le méthane, sont souvent décrites comme des « boules de neige sales ». Presque toutes nous demeurent invisibles et passent la plus grande partie de leur temps à rôder dans les régions froides du système solaire, bien au-delà de Neptune ou de Pluton. Il leur arrive cependant de foncer vers le Soleil selon des trajectoires presque radiales ; elles se réchauffent alors assez pour vaporiser de la glace, ce qui libère du gaz et de la poussière dans lesquels se reflète la lumière solaire et donne ces « queues » que nous voyons bien. Les

astéroïdes, objets plus volatiles que les comètes et composés de matière rocheuse, tournent de façon quasi circulaire autour du Soleil, entre les orbites de Mars et de Jupiter. La plupart restent trop éloignés de nous pour être dangereux, mais certains, appelés géocroiseurs, suivent des orbites susceptibles de croiser celle de la Terre.

Ces géocroiseurs sont de tailles très variées allant du simple caillou à celles de « petites planètes » de plus de cent kilomètres de diamètre. On pense qu'un astéroïde de dix kilomètres de diamètre, capable de provoquer une catastrophe planétaire et des extinctions massives, peut frapper la Terre entre une fois tous les cinquante millions d'années seulement et une fois tous les cent millions d'années. Celui qui a creusé le cratère de Chicxulub est peut-être l'événement le plus récent de cette ampleur. Deux autres cratères de même dimension, l'un à Woodleigh en Australie, l'autre à Manicouagan, près du Québec, pourraient provenir d'impacts semblables advenus il y a deux cents à deux cent cinquante millions d'années, et l'un d'eux fut peut-être à l'origine des extinctions d'espèces les plus importantes de toutes, advenues lors de la transition entre le permien et le triasique. A l'époque, l'océan Atlantique n'existait pas et la plus grande partie des terres ne formait qu'un seul et même continent connu sous le nom de Pangée.

Les petits astéroïdes, aux impacts moins dévastateurs, sont beaucoup plus communs ; les géocroiseurs d'un kilomètre de diamètre sont en effet cent fois plus nombreux que ceux de dix kilomètres de diamètre responsables des extinctions d'espèces, et les éléments de cent mètres de diamètre probablement cent fois plus fréquents encore. Le célèbre cratère Barringer en Arizona a été creusé il y a quelque cinquante mille ans par un

astéroïde de près de cent mètres de diamètre ; un cratère semblable à Wolfe Creek en Australie date d'environ trois cent mille ans. Il semble que des géocroiseurs de cinquante mètres de diamètre frappent la Terre une fois par siècle. En 1908, la météorite Tougouska dévasta une région retirée de Sibérie. Sa vitesse (près de 40 kilomètres/seconde) était telle que l'impact correspondit à la force d'une explosion de quarante mégatonnes ; elle se vaporisa et explosa très haut dans l'atmosphère, gommant mille kilomètres carrés de forêt mais ne laissant pas de cratère d'impact.

Un risque faible mais non négligeable

Nous ignorons si un grand géocroiseur frappera la Terre au cours du XXI^e siècle. Nous en savons néanmoins assez sur le nombre d'astéroïdes présents sur les orbites croisant celle de la Terre pour quantifier cette probabilité. Le risque, qui est de cinquante pour cent, n'est pas important au point de nous empêcher de dormir ; la majeure partie de la surface terrestre est constituée d'océans ou de régions faiblement peuplées et un impact sur une région à forte densité de population est donc peu probable. Mais il n'est pas négligeable pour autant et causerait des millions de morts.

Les inondations, tornades et séismes constituent des dangers beaucoup plus grands. Un tremblement de terre à Tokyo ou à Los Angeles, régions les plus exposées aux pires catastrophes naturelles, entraînerait une dévastation immédiate dont les « retombées » à long terme affecteraient l'économie mondiale. Mais pour l'Europe et les régions d'Amérique du Nord moins exposées aux

séismes et aux ouragans, un impact d'astéroïde demeure le premier risque naturel. Il ne s'agirait probablement pas d'un événement de l'ampleur de Tougouska mais de chocs moindres qui dévasteraient chaque fois d'immenses superficies.

Quelqu'un de vingt-cinq ans dont l'espérance de vie est aujourd'hui d'environ cinquante ans peut être victime d'un impact d'astéroïde majeur pendant ce laps de temps. D'ici là, il existe environ une chance sur dix mille qu'un astéroïde de cinq cents mètres de diamètre s'écrase dans l'Atlantique Nord et provoque des raz-de-marée, détruisant les côtes nord-américaines et européennes ; dans le Pacifique, son impact dévasterait les côtes d'Asie orientale et de l'ouest des Etats-Unis. La probabilité que des millions d'entre nous perdent la vie au cours d'un tel événement est à peu près la même que de la mort de monsieur Tout-le-Monde au cours d'un accident d'avion (ce risque étant majoré s'il vit près d'une côte, où les raz-de-marée mineurs sont plus fréquents).

C'est un risque faible² mais il n'est pas moins élevé que d'autres, contre lesquels les gouvernements tentent de nous prémunir. Une récente étude sur les géocroiseurs commandée par les autorités britanniques présentait ainsi les choses : « Si un quart de la population mondiale courait le risque de subir l'impact d'un objet d'un kilomètre de diamètre, et quand bien même un tel événement n'advient en moyenne qu'une fois tous les cent mille ans, alors, d'après les critères de sécurité actuellement en vigueur au Royaume-Uni, ce risque serait très supérieur au niveau acceptable. Si ce type de danger émanait d'une usine ou de toute autre activité industrielle, les responsables seraient dans l'obligation de prendre des mesures pour le réduire. »

Nous ne pouvons rien faire pour changer la trajectoire d'un géocroiseur, mais sa détection et sa surveillance nous permettraient d'anticiper, des années à l'avance, une catastrophe d'envergure. Si nous apprenions par exemple qu'un impact allait advenir au milieu de l'Atlantique, l'évacuation des régions côtières pourrait sauver des millions de vies. La communauté internationale dépense des milliards de dollars par an à prédire le temps qu'il va faire et peut ainsi prévoir les ouragans : il semblerait judicieux d'investir quelques millions pour se prémunir, comme dans le film *Deep Impact*, d'un raz-de-marée géant (très improbable mais dévastateur).

Réduire le risque ?

Autre motif d'observation et d'inventaire des géocroiseurs de façon à avoir une connaissance très pointue de leurs orbites : à long terme, on pourrait peut-être dévier leur trajectoire et les éloigner de la Terre. Dans *Rendez-vous with Rama*, le roman d'Arthur C. Clarke, un événement de type Toungouska³ balaie l'Italie du Nord. (Clarke le place en 2077 et, étrangement, un 11 septembre.) « Passé le premier choc, lit-on, les êtres humains réagirent avec une détermination et une unanimité inédites jusqu'alors. Ce genre de catastrophe pourrait certes ne pas se reproduire avant mille ans – mais si elle se reproduisait demain ... ? Eh bien, qu'à cela ne tienne : il n'y aurait plus de prochaine fois ! Aucune météorite assez grande pour provoquer une catastrophe ne serait à nouveau en mesure de prendre la

Terre par surprise. Ainsi commença le Projet Sauvegarde. »

Les projets de ce type⁴, qui non seulement nous avertiraient des impacts d'astéroïdes mais nous en protégeraient, ne participent pas nécessairement de la science-fiction : ils pourraient être mis en place en cinquante ans. Nous serions alors technologiquement capables de dévier la trajectoire⁵ de ces objets et d'en écarter le danger ; car plus nous prendrions d'avance en matière de prévention, plus la repoussée orbitale nécessaire à éloigner la trajectoire serait faible. Mais ce type de procédé demeure aléatoire tant que nous n'en savons pas beaucoup plus sur la composition d'un astéroïde. Certains sont de gros rochers ronds, mais d'autres (voire la plupart) peuvent être des amas de rochers simplement « collés » les uns aux autres par leur très faible gravité. Dans ce dernier cas, la déviation de trajectoire de l'astéroïde par une méthode radicale, comme une explosion nucléaire par exemple, pourrait le faire éclater en morceaux, ce qui s'avérerait plus dangereux pour nous qu'un astéroïde entier.

Les comètes, plus difficiles à appréhender, demeurent un risque insoluble et peut-être irréductible. Certaines, comme celle de Halley, ne cessent de réapparaître sur des orbites bien définies, mais la plupart surgissent « tout à coup » des profondeurs de l'espace, ce qui ne nous laisse qu'un an d'avertissement. Leurs orbites sont aussi quelque peu erratiques car il en gicle du gaz, et des fragments s'en détachent de façon imprévisible.

Un indice numérique du niveau de gravité de catastrophes peu probables a été dressé par Richard Binzel, professeur au Massachusetts Institute of Technology ; adopté lors d'une conférence internationale tenue à

Turin, il est aujourd'hui connu sous le nom d'échelle de Turin⁶ de 1 à 10. C'est l'équivalent de la célèbre échelle sismologique de Richter, mais outre qu'elle gradue la magnitude d'un événement, l'échelle de Turin tient aussi compte de sa probabilité : la gravité d'un danger potentiel est évaluée en fonction de sa probabilité, multipliée par l'ampleur des dévastations qu'il provoquerait. Un astéroïde de cinquante mètres, comme celui qui a explosé au-dessus de la Sibérie en 1908, serait classé 8 sur l'échelle de Turin si la collision avec la Terre était certaine ; un astéroïde d'un kilomètre aurait la gradation 10 si la collision était certaine, mais seulement 8 si, peu informés sur son orbite, nous ne pouvions prédire qu'une chose : le passage de l'objet à un million de kilomètres de la Terre. Le diamètre de celle-ci n'étant que de 12 750 kilomètres, les chances que l'astéroïde « mette dans le mille » ne seraient alors que d'une sur dix mille.

L'indice de Turin assigné à un événement spécifique peut changer en fonction des connaissances que nous en acquérons. Par exemple, il peut dans un premier temps être difficile de prédire la trajectoire d'un ouragan mais, à mesure qu'il progresse, on peut prévoir de façon plus affinée s'il passera ou non sur telle île très peuplée. De même, plus nous prenons le temps d'observer un géocroiseur, plus se précisent nos informations concernant sa future trajectoire. Les gros astéroïdes qui pourraient menacer la Terre sont régulièrement identifiés. Mais une fois leurs orbites évaluées avec plus de précision, on est généralement certain que ces corps ne nous frapperont pas ; leur classement sur l'échelle de Turin est alors de zéro. Cependant, dans les rares cas où sont pronostiqués des points d'impacts, dont la Terre, on a

des raisons de s'inquiéter et la gradation dans l'échelle de Turin s'élève alors, passant de 8 à 10, par exemple.

Les experts en matière de géocroiseurs ont également mis au point l'échelle de Palerme⁷, indice plus sûr qui prend en compte le laps de temps au bout duquel aura lieu l'impact éventuel, ce qui précise encore la gravité du danger. Si l'on sait, par exemple, qu'un astéroïde de cinquante mètres de diamètre nous frappera l'année prochaine, l'événement sera classé haut sur l'échelle de Palerme ; mais si l'on prédit avec autant de certitude que l'impact aura lieu en 2890, nous ne serons pas plus inquiets pour autant : non seulement les risques futurs seront écartés (ils seront si éloignés dans le temps que nous ne serons plus là pour les subir), mais la loi des probabilités nous dit qu'avant que cet événement particulier n'advienne, plusieurs autres impacts de type Tougouska se produiront.

Tenter, même modestement, de contrôler les grands géocroiseurs susceptibles de menacer notre planète ne serait pas inutile. Si nous devons conclure qu'aucun d'eux ne frappera la Terre au cours des cinquante prochaines années, notre soulagement justifierait le faible financement investi. Si les conclusions étaient plus pessimistes, nous serions au moins en mesure de nous faire à l'idée d'un impact ; en outre, s'il était prévu d'ici cinquante ans, peut-être aurions-nous le temps de mettre au point la technologie nécessaire à dévier la trajectoire du géocroiseur. Il serait également utile d'affiner nos connaissances statistiques des petits astéroïdes, même si, l'un d'eux se dirigeant vers nous, nous ne pourrions pas nous y préparer assez longtemps à l'avance.

Les éruptions majeures

Outre les menaces omniprésentes que constituent les impacts d'astéroïdes et de comètes, d'autres catastrophes naturelles sont difficiles à prévoir à long terme : les séismes et les éruptions volcaniques extrêmement violents, par exemple. Parmi ces dernières figurent les « éruptions majeures », mille fois plus importantes que celle du Krakatoa en 1883, qui projetteraient des milliers de kilomètres cubes de débris dans l'atmosphère supérieure. Un cratère du Wyoming, de quatre-vingts kilomètres de diamètre, témoigne de ce type d'événement datant d'un million d'années. Plus près de nous, une éruption majeure au nord de Sumatra il y a soixante-dix mille ans laissa un cratère d'un kilomètre de diamètre et projeta plusieurs milliers de kilomètres cubes de cendres, cachant la lumière solaire pendant plus d'un an.

Nous avons cependant deux raisons de ne pas nous inquiéter outre mesure de ces catastrophes naturelles majeures. D'abord, les impacts de gros astéroïdes et les éruptions volcaniques colossales adviennent si rarement qu'il n'y a pas lieu d'en être angoissé (même si, la technologie aidant, investir dans la réduction de ces risques ne serait pas inutile). Ensuite, la fréquence de ces catastrophes n'augmente pas ; nous en sommes plus conscients que les générations précédentes et plus méfiants qu'elles face aux risques, mais aucune de nos activités n'est susceptible de les accroître.

Ceux-ci ne sont donc que des moyens de « jauger » les menaces croissantes pour l'environnement induites par l'homme, et qui, selon les scénarios les plus pessimistes, pourraient s'avérer mille fois plus inquiétantes.

8.

Les dangers induits par l'homme

Encore mal appréhendées, les transformations de l'environnement du fait des activités humaines peuvent être plus graves que les catastrophes naturelles que sont les séismes, éruptions volcaniques et impacts d'astéroïdes.

« La vie dans son ensemble – biosphère pour les scientifiques, création pour les théologiens – est d'abord une membrane d'organismes qui enveloppe la Terre ; elle est tellement fine qu'elle est invisible de profil à partir d'un vaisseau spatial, mais à l'intérieur, tout est si complexe que la plupart des espèces qui la composent nous sont encore inconnues. » C'est ainsi que E.O. Wilson, dans *The Future of Life*¹, attire notre attention sur la fragilité complexe du « vaisseau spatial Terre ».

Or, le nombre d'espèces végétales et animales

vivant sur Terre est en voie de réduction du fait de l'homme. L'extinction est, certes, un phénomène intrinsèque à l'évolution et à la sélection naturelles et, de l'ensemble des espèces aquatiques, rampantes ou volantes qui ont de tout temps existé, moins de dix pour cent sont encore là aujourd'hui. Mais il a fallu plus d'un milliard d'années et un extraordinaire cortège d'espèces, ayant chacune vécu plusieurs millions d'années, pour passer des organismes unicellulaires à notre biosphère actuelle.

Les fossiles nous apprennent qu'à l'époque cambrienne, il y a cinq cent cinquante millions d'années, une faune aquatique et rampante a évolué et mené à une grande diversité d'espèces. Pendant les deux cent millions d'années suivantes, la végétation est apparue sur la Terre, permettant l'apparition et la vie de créatures étranges : libellules aussi grosses que des mouettes, mille-pattes mesurant plus d'un mètre de long, scorpions géants et monstres marins de la famille des calmars. Puis vinrent les dinosaures. Leur disparition soudaine il y a soixante-cinq millions d'années a ouvert la voie aux mammifères, à l'émergence des singes puis à celle des humains.

La sixième extinction

Les études géologiques font état de cinq grandes extinctions, dont les deux plus importantes advinrent il y a environ 250 et 65 millions d'années. Une « sixième extinction » est en cours par la faute des humains. Les espèces disparaissent en effet aujourd'hui de cent à mille fois plus vite que normalement. Avant l'apparition de

l'homo sapiens, environ une espèce sur un million disparaissait chaque année ; il en meurt actuellement une tous les cent ans. Certaines sont directement éliminées, mais la plupart des extinctions participent d'intentions humaines involontaires, conséquence des transformations de l'habitat ou de l'introduction dans l'écosystème d'espèces non indigènes.

Ces extinctions sont navrantes, et pas seulement pour les raisons esthétiques et sentimentales démesurées qu'inspire la petite minorité des vertébrés à plumes, à fourrure et surtout marines. D'un point de vue purement utilitaire, nous détruisons la variété génétique qui pourrait s'avérer précieuse pour nous, la plupart des espèces n'étant même pas encore cataloguées ; comme le dit Robert May, « nous brûlons les livres avant d'avoir appris à les lire² ». Il serait urgent d'envisager de prélever et de congeler des échantillons de la faune complète d'une forêt tropicale, pour les ranger dans une « bibliothèque de la vie » telle qu'imaginée par Gregory Benford³, non pour remplacer des mesures conservatoires mais pour nous « assurer ».

Les progrès biologiques aggravent encore les menaces qui pèsent sur la biosphère. Par exemple, le saumon d'élevage, génétiquement modifié pour être plus gros et parvenir plus vite à maturité, risque de prendre le pas sur le saumon sauvage s'il s'échappe dans la nature. Pire encore, en se propageant sans qu'on l'ait voulu, de nouvelles maladies pourraient contribuer à détruire certaines espèces. Mais la diminution imminente des richesses naturelles démontre surtout notre incapacité à gérer la Planète.

Souhaiter un monde « naturel » préservé est cependant naïf. La nature, à laquelle nous tenons – en ce qui

me concerne, je suis particulièrement attaché à la campagne anglaise –, n'est en fait qu'une création artificielle, le produit de siècles de cultures intensives, enrichies de nombreuses variétés végétales étrangères introduites par les agriculteurs et les jardiniers. Même le paysage du « Far West » américain est loin d'être naturel ; bien avant les transformations pratiquées par les premiers colons et celles, encore plus intensives, du *XX^e* siècle, les Indiens avaient travaillé le sol, et la culture sur brûlis était pratiquée depuis au moins mille ans, d'où ce paysage, plus ouvert, moins arboré qu'il ne l'était à l'origine.

Les prévisions de populations

A long terme, les effets de l'activité humaine sur la Terre dépendent à la fois des populations et des styles de vie. Selon les estimations du Fonds mondial de protection de la nature, il faudrait, en 2050, une surface équivalant à « près de trois planètes » pour subvenir aux besoins de la population mondiale. Cette évaluation est controversée et peut-être un peu tendancieuse, entre autres parce que cette superficie, ou « empreinte⁴ », englobe la surface forestière requise pour absorber le dioxyde de carbone provenant de la consommation d'énergie par personne. Mais elle ne tient pas compte d'un passage à l'utilisation d'énergies renouvelables, ni du fait qu'une petite augmentation des niveaux de dioxyde de carbone est tolérable. Il est néanmoins évident que les besoins de la population mondiale ne pourront être pourvus si les classes moyennes européennes et nord-américaines continuent à vivre comme aujourd'hui.

Une population de dix milliards de personnes serait tout à fait viable si, au lieu du consumérisme effréné de l'Occident nanti, les humains adoptaient un style de vie frugal et peu de besoins en énergie et en ressources naturelles : minuscules appartements du type des « hôtels capsules » existant déjà à Tokyo, régime alimentaire végétarien à base de riz, déplacements rares et divertissements basés sur la réalité virtuelle. Ceci ne serait pas pour autant incompatible avec les progrès culturels et techniques car les principaux moteurs d'expansion économique que sont la miniaturisation et les technologies de l'information affectent peu l'environnement.

Ce qui serait souhaitable, à condition de survivre jusqu'au siècle prochain sans catastrophes, serait une population mondiale inférieure à celle d'aujourd'hui (et bien inférieure à son summum projeté vers 2050).

Or, bien que le taux de fertilité de nombreux pays développés et d'autres accuse une baisse impressionnante du fait de la libération des femmes, la population mondiale augmente – comme par exemple dans certains pays d'Europe –, du fait de l'immigration et de l'allongement de l'espérance de vie. A l'exclusion des pays les plus pauvres, cette dernière croît en effet grâce au progrès médical et aux politiques de santé publique.

Sauf catastrophe inattendue, la population mondiale va donc augmenter jusqu'en 2050, où elle atteindra huit milliards, cette estimation étant basée sur la nette prédominance actuelle des populations jeunes dans les pays développés. Combinée avec l'urbanisation galopante, cet accroissement de population donnera lieu à l'existence d'au moins vingt « mégacités » de plus de vingt millions d'habitants.

Du fait de la diminution impressionnante du taux de

fertilité, les Nations-Unies ont cependant revu leurs prévisions de population à la baisse ; on estime actuellement que, si les progrès de la médecine n'allongent pas l'espérance de vie dans les proportions importantes prévues par les experts, la population commencera à diminuer à partir de 2050 pour retrouver peut-être son niveau actuel vers la fin du siècle, et les « plus de cinquante ans » prédomineront en Europe et en Amérique du Nord. Il se peut néanmoins que cette tendance soit occultée par l'immigration issue des pays en voie de développement, aux Etats-Unis en particulier, la stabilisation puis la baisse (si elle advient jamais) étant alors retardées.

Ces prévisions dépendent bien sûr de paramètres sociaux. Si les gouvernements européens s'inquiétaient de la baisse de leurs populations, des mesures natalistes seraient mises en œuvre. Dans le cas contraire, la propagation d'épidémies dans les mégacités pourrait réduire la population mondiale aux niveaux catastrophiques déjà projetés pour certaines régions d'Afrique, d'ailleurs susceptibles d'être radicalement démentis d'ici 2050 par les progrès de la robotique et de la médecine envisagés par les passionnés de technologie.

Ces prévisions doivent également tenir compte du fléau que constitue le SIDA, apparu dans les années 1980 et qui n'a pas atteint son maximum. Cette pandémie en expansion est sur le point de dévaster l'Afrique. En Afrique du Sud⁵, près de dix pour cent des 42 millions d'habitants sont séropositifs et l'on craint que la maladie ne fasse sept millions de victimes dans ce seul pays d'ici 2010, éliminant la tranche d'âge la plus productive, réduisant de vingt ans l'espérance de vie et faisant des millions de jeunes orphelins. On prévoit que des millions de personnes seront également touchées en Russie, et le

nombre total de malades augmente en Chine et en Inde, où le SIDA risque de causer plus de morts qu'en Afrique au cours des dix prochaines années.

Pouvons-nous craindre d'autres calamités « naturelles⁶ » ? Certains experts se montrent rassurants face à tant de pessimisme. Paul W. Erwald fait par exemple remarquer qu'au cours du siècle précédent, le monde entier a été exposé aux agents pathogènes lors des brassages de population nés des migrations internationales, mais une seule pandémie fut dévastatrice : le SIDA. Il note également que d'autres virus naturels, comme l'Ebola, ne durèrent pas assez longtemps pour provoquer une épidémie galopante. Mais ce point de vue se veut optimiste et ne tient pas compte du risque que constituerait une épidémie déclenchée non par la nature mais par une bio-erreur ou le bio-terrorisme.

Les inconstances du climat

Les changements climatiques font partie de l'évolution historique de la Terre au même titre que la disparition des espèces ; mais, comme pour celle-ci, leur fréquence est accélérée par l'activité humaine de façon préoccupante.

Le climat change naturellement sur des périodes variées allant d'une dizaine à une centaine d'années⁷. Il s'est même modifié de façon notoire pendant la période relativement courte depuis laquelle sont notées ses variations. Il y a cent ans, il faisait plus chaud en Europe du Nord qu'aujourd'hui : des peuplements de fermiers vivaient au Groenland et les animaux paissaient sur l'herbe actuellement recouverte par les glaces ; et l'on

faisait pousser de la vigne en Angleterre. L'ère de temps chaud semble avoir pris fin vers le xv^e siècle et a été suivie d'une « courte période glaciaire » qui a duré jusqu'à la fin du $xviii^e$ siècle. Au cours de celle-ci, la couche de glace était si épaisse sur la Tamise que l'on pouvait y faire du feu, et les glaciers alpins ont progressé. Cette « courte période glaciaire » est peut-être un indice de taille pour répondre à la question que l'on ne cesse de se poser, à savoir : les mouvements du Soleil peuvent-ils déclencher des variations climatiques ? Car au cours de cette période froide, le Soleil semble s'être comporté quelque peu bizarrement. Pendant la seconde moitié du $xvii^e$ siècle et au début du $xviii^e$, il y eut une énigmatique période de soixante-dix ans, surnommée minimum de Maunder (du nom du chercheur qui le remarqua en premier), pendant laquelle il n'y eut quasiment pas de taches solaires. Or, l'activité sur la turbulente surface du Soleil – poussées de feu, taches, etc. – grimpe normalement vers un summum pour redescendre ensuite, et ce cycle se répète en gros tous les onze ou douze ans, périodicité qui, dit-on, affecterait aussi la température moyenne. Comme on prétend que les cycles économiques « correspondent » à l'activité solaire, on suppose de même depuis plus de deux cents ans sans en être certain que celle-ci affecte le climat.

Personne ne comprend vraiment comment les poussées de feu et les taches solaires (ou leur absence) pourraient affecter le climat. Les taches solaires sont liées au comportement magnétique du Soleil et aux poussées de feu qui engendrent des particules très rapides venant frapper la Terre. Ces particules ne comportent qu'une minuscule fraction d'énergie solaire, mais pourquoi ne pas concevoir, dans l'atmosphère supérieure, un

« amplificateur » qui les rende capables de modifier substantiellement la couverture nuageuse ?

Les grandes éruptions volcaniques affectent elles aussi le climat. Celle du Tambora en Indonésie, advenue en 1815, projeta dans la stratosphère près de cent kilomètres cubes de poussière, ainsi que des gaz qui se mélangèrent avec la vapeur d'eau et créèrent une atmosphère constituée de gouttes d'acide sulfurique. L'année suivante, l'Europe et la Nouvelle-Angleterre connurent un climat exceptionnellement froid et l'on appela cette période « l'année sans été » (au cours de laquelle Marie Shelley écrivit *Frankenstein*).

Un changement climatique d'origine humaine totalement imprévu fut l'apparition d'un trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique, causé par les réactions chimiques au sein de la stratosphère des chlorofluorocarbones (CFC), utilisés dans les bombes aérosols et comme gaz réfrigérant. Un accord international visant à réduire la quantité de ces gaz indésirables est parvenu à combler le trou d'ozone. Nous avons eu de la chance que le problème soit si vite résolu. Selon Paul Crutzen, un des chimistes qui comprirent comment les CFC agissent dans la haute atmosphère, un accident technique doublé d'un caprice de la chimie avaient fait du chlore la base de ce réfrigérant commercial adopté dans les années 1930 : les effets sur l'atmosphère auraient été plus violents et plus durables si l'on avait utilisé du brome.

L'effet de serre

Contrairement à la diminution de la couche d'ozone, le réchauffement de la Terre dû à ce que l'on

nomme l'« effet de serre » est un problème environnemental dépourvu de solution rapide. L'atmosphère absorbe plus de lumière solaire que de « radiations chauffantes » infrarouges émises par la Terre ; la chaleur est alors « piégée⁸ », un peu comme dans une serre. A l'instar de la vapeur d'eau et du méthane, le dioxyde de carbone est un des « gaz à effet de serre ». Comme nous consommons de plus en plus de gaz fossiles, le volume de dioxyde de carbone de l'atmosphère est déjà 50 % supérieur à celui que créent nos industries, et l'on sait qu'au cours du *XXI^e* siècle, il en résultera un réchauffement de la Terre, probablement de deux à cinq degrés. Ne serait-il que de deux degrés – ce qui est une estimation optimiste –, le climat de certaines régions du monde en serait très bouleversé (augmentation de la fréquence des orages et autres phénomènes extrêmes).

Le climat est un phénomène auquel les humains s'adaptent depuis toujours, tout comme la faune et la flore. Le réchauffement de la Terre pourrait nous affecter de façon préoccupante en raison de son extrême rapidité par rapport aux changements advenus naturellement jusqu'à présent, c'est-à-dire trop vite pour que la végétation et nous-mêmes ayons le temps de nous y adapter. Il peut en effet provoquer une hausse du niveau des mers, une augmentation des climats extrêmes et, à haute altitude, une vague de maladies propagées par les moustiques. La bonne nouvelle (pour nous humains) est la modération du climat au Canada et en Sibérie.

Un réchauffement global régulier de deux ou trois degrés freinerait la croissance économique et appauvrirait de nombreux pays. Il faudrait en outre adapter l'agriculture, protéger les océans et lutter contre la sécheresse croissante dans certaines régions. Mais cette faible

hausse ne constituerait pas une catastrophe planétaire, dans la mesure où une action concertée des gouvernements pourrait en atténuer les conséquences.

Le ralentissement apparent de la croissance de population est bien sûr une bonne chose eu égard aux scénarios de réchauffement global car les émissions de gaz à effet de serre sont alors moindres. Mais l'inertie des systèmes atmosphérique et océanique est assez grande pour faire augmenter la température moyenne d'au moins deux degrés d'ici 2100. Au-delà de cette date, les prévisions dépendent évidemment de l'ampleur de la population humaine et de ses activités. On ignore également si les gaz fossiles seront ou non remplacés par d'autres sources d'énergie. Les optimistes⁹ pensent que c'est inévitable. Bjorn Lomborg cite par exemple un ministre de l'Industrie saoudien selon lequel « l'ère du pétrole aura une fin mais non parce qu'il n'y aura plus de pétrole, tout comme l'âge de pierre s'est éteint non par manque de pierres ». Quoi qu'il en soit, la plupart des experts pensent que les limites imposées aux émissions de dioxyde de carbone sont non seulement bénéfiques pour l'environnement mais qu'elles stimulent aussi la recherche de sources d'énergie renouvelables.

Quels sont les « scénarios catastrophes » ?

De l'avis quasi général, les conflits idéologiques Est-Ouest qui ont provoqué le face-à-face nucléaire furent un prétexte pour détourner notre attention des problèmes immédiats : pauvreté et risques environnementaux. Aux séculaires « menaces sans ennemis » que sont les phénomènes naturels s'ajoutent à présent celles que

les humains font peser sur la biosphère et les océans. La biosphère s'est toujours transformée, mais ses avatars actuels – pollution, diminution de la biodiversité, réchauffement global, etc. – s'accroissent de façon inédite.

Les dommages préoccupants sur l'environnement vont empirer, et l'écosystème peut ne pas être en mesure de s'y adapter. Même si le réchauffement de la planète advient lentement, ses conséquences – concurrence pour l'eau et migrations massives, par exemple – pourraient engendrer des tensions, voire des conflits régionaux et mondiaux, lesquels seraient encore aggravés en cas de croissance continue de la population mondiale. Qu'en sera-t-il si les groupuscules accèdent au pouvoir que donnent les nouvelles technologies ?

Par ailleurs, les aléas et la complexité de l'interaction entre l'atmosphère et les océans pourraient engendrer d'ici 2100 un réchauffement de la planète bien supérieur aux cinq degrés prévus par les plus optimistes. Pire, il pourrait ne pas demeurer simplement « linéaire », c'est-à-dire directement proportionnel à la concentration accrue de dioxyde de carbone, mais donner lieu à un brusque changement du schéma de circulation des vents et des océans.

Le Gulf Stream fait partie d'un système dit en « courroie de transmission¹⁰ » qui oriente les courants d'eau chaude de surface dans le sens nord-est, vers l'Europe, et reviennent plus en profondeur et refroidis. La fonte des glaces du Groenland produirait un énorme volume d'eau froide qui, en se mélangeant à l'eau salée, la diluerait et la rendrait si active qu'elle n'irait pas vers le bas, même une fois refroidie. Cette injection d'eau froide étoufferait la circulation thermohaline maintenue

par la salinité et la température des océans, indispensable au maintien du climat tempéré de l'Europe du Nord. Si le Gulf Stream était interrompu ou inversé, la Grande-Bretagne et les pays voisins pourraient être plongés dans des hivers quasi arctiques comme ceux qui prévalent actuellement aux mêmes latitudes au Canada ou en Sibérie.

Grâce à la mesure des couches de glace du Groenland et de l'Antarctique, qui constituent une sorte de registre des températures, nous savons que de tels bouleversements ont eu lieu dans le passé. Des refroidissements importants de plusieurs dizaines d'années ou moins sont en effet survenus fréquemment au cours des derniers siècles. Lors des huit siècles précédents, le climat semble avoir été étonnamment stable, et l'on s'inquiète de ce que le réchauffement induit par l'homme ne provoque le prochain « basculement » du Gulf Stream bien plus vite que prévu¹¹.

Si tel était le cas, et bien que les effets puissent être positifs dans certaines régions du monde, ce phénomène serait catastrophique pour l'Europe occidentale. Un autre scénario (assez improbable, il est vrai) serait un « effet de serre incontrôlable », l'augmentation des températures entraînant des émissions accrues de gaz à effet de serre. Pour que l'eau des océans s'évapore de façon incontrôlable, il faudrait que la température terrestre soit bien plus élevée qu'elle ne l'est¹², mais on ne peut exclure le risque d'une catastrophe à l'échelle planétaire provoquée par l'émission d'un énorme volume de méthane (gaz à effet de serre au moins vingt fois plus efficace que le dioxyde de carbone) piégé dans le sol.

Il serait rassurant d'être absolument certains que seules adviendront les variations climatiques

« linéaires » : mieux vaut un risque majeur d'événements contrôlables qu'un risque faible de grande catastrophe. L'humanité ne pourrait pas être détruite d'un coup par les seules variations climatiques les plus rudes qu'on puisse imaginer, mais les pires de celles-ci accompagnées de basculements vers des schémas climatiques variables et extrêmes pourraient mettre fin à des décennies de progrès économiques et sociaux.

Même si un tel phénomène n'avait qu'une chance sur cent de se produire, cela justifierait des mesures de précaution plus convaincantes que celles du protocole de Kyoto, qui exige que, d'ici 2012, les pays ramènent leurs émissions de dioxyde de carbone à leurs niveaux de 1990.

Je conclurai ce chapitre en citant la sobre déclaration du prince Charles, dont le point de vue est rarement approuvé par les scientifiques : « De tous les dangers qui menacent notre sécurité, les problèmes d'environnement et de développement planétaires sont les plus complexes, les plus inextricables et potentiellement les plus dévastateurs. La réalité pourrait s'avérer pire que les prévisions optimistes des scientifiques... qui ne saisissent pas toutes les conséquences de nos agressions tous azimuts sur l'interaction entre l'atmosphère, les milieux marin et terrestre et les diverses formes de vie. En matière militaire, on prône depuis longtemps la nécessité de se préparer au pire. Pourquoi en est-il autrement quand il s'agit de la sécurité de la planète et de notre avenir à long terme¹³ ? »

9.

Les risques extrêmes

Un pari pascalien

A partir de quel niveau de risque reconnu certaines expériences dangereuses devraient-elles être interdites ?

Blaise Pascal a tenté de convaincre les incroyants qu'en pariant pour l'existence de Dieu, ils n'avaient rien à perdre et tout à gagner. Selon lui, mieux vaut être prudent et payer le prix limité du renoncement aux plaisirs interdits de la vie que prendre le risque, même infime, d'encourir l'enfer éternel dans la mort.

Le « pari » de Pascal, qui n'inspire pas grand monde de nos jours, pas même les croyants, est une version extrême de notre « principe de précaution¹ », très souvent invoqué en matière de santé et d'environnement. Par exemple, les conséquences à long terme des modi-

fications génétiques de la faune et de la flore sur notre santé et sur l'équilibre écologique sont de toute évidence incertaines mais, si une catastrophe semble improbable, on ne peut affirmer qu'elle est impossible. Les tenants du principe de précaution incitent donc à la prudence : il incomberait aux partisans de la modification génétique de nous convaincre, au moins, que ces procédés présentent des avantages précis et concrets justifiant quelques risques négligeables. De même que si nous renoncions au confort permis par la consommation excessive d'énergie, nous réduirions les conséquences délétères du réchauffement de la Terre – d'autant que celles-ci pourraient s'avérer bien plus graves que les estimations les plus optimistes.

La technologie et les perspectives qu'elle ouvre ne vont pas sans le risque de désastres potentiels en cascade, fruits de mauvaises intentions mais aussi de l'inadvertance (pandémies accidentelles sans antidotes et autres menaces robotiques et nanotechnologiques encore plus effrayantes).

On ne peut pas non plus écarter le fait que la physique soit elle aussi porteuse de dangers puisque certaines expériences sont entreprises pour générer des conditions extrêmes qui n'advviendraient pas naturellement et dont personne ne connaît l'issue – le contraire ne servirait d'ailleurs à rien. Selon certains, des événements incontrôlables produits en laboratoire pourraient être fatals non seulement à l'humanité mais à la Terre elle-même. Une catastrophe de ce genre est certes plus aléatoire qu'un accident biologique ou technologique provoqué par l'homme, et encore plus improbable qu'un impact de gros astéroïde ; mais à supposer qu'elle advienne, les conséquences iraient bien au-delà de la

« simple » destruction de la civilisation ou même de l'humanité. Encore faut-il savoir comment quantifier l'horreur, quelles précautions prendre, et qui doit les prendre, face à des événements hautement improbables mais dont l'issue négative serait « quasiment infinie ». Serions-nous donc bien avisés de parier sur la prudence, comme Pascal, en renonçant à certains types d'expériences ?

La Terre en danger

Ces grandes questions touchant la mise en danger de la planète datent du projet de bombe atomique né lors de la Seconde Guerre mondiale. Pouvait-on en effet être absolument certain qu'une explosion nucléaire ne ferait pas exploser l'atmosphère et les océans ? Avant les premiers essais nucléaires de 1945 au Nouveau-Mexique, Edward Teller² et deux collègues s'interrogèrent à ce sujet dans un rapport publié à Los Alamos³. Une de leurs préoccupations portait sur la réaction peut-être incontrôlable de l'azote atmosphérique. « Le seul aspect inquiétant, écrivaient-ils, est que la baisse de température entraîne une diminution rapide de la "marge de sécurité." » On sait aujourd'hui que la « marge de sécurité » était en réalité confortable ; on peut néanmoins se demander jusqu'où aurait dû baisser cette marge supposée pour que les autorités jugent prudent d'abandonner les essais sur la bombe H.

Nous savons à présent avec certitude qu'une seule bombe atomique a un pouvoir de destruction énorme mais ne peut entraîner une réaction en chaîne susceptible de détruire la Terre ou son atmosphère (cela dit, si les

arsenals américains et russes étaient utilisés, ils pourraient faire autant de mal que n'importe quelle catastrophe naturelle envisageable au cours du siècle à venir). Certaines expérimentations physiques menées pour des raisons de pure spéculation scientifique pourraient cependant, dit-on, constituer des menaces planétaires ou même cosmiques.

La plupart des physiciens (moi y compris) considèrent celles-ci comme très, très improbables, et ce, sur la base de deux méthodes différentes d'estimation du danger, qu'il est important d'expliciter. La première est une probabilité ferme et objective ; elle s'applique quand le mécanisme sous-jacent est bien compris, ou quand l'événement étudié s'est reproduit plusieurs fois antérieurement. Par exemple, il est facile de dire qu'une pièce de monnaie non truquée lancée en l'air dix fois a un peu moins d'une chance sur mille de tomber dix fois sur le côté pile ; il est également aisé de quantifier les risques de contagion des oreillons lors d'une épidémie, car même sans comprendre les détails biologiques de la transmission du virus, les informations sur les épidémies précédentes sont connues. La seconde probabilité n'est, elle, rien d'autre qu'une hypothèse bien informée, qui peut varier avec les connaissances que l'on acquiert. Dans une enquête, la police peut dire qu'il lui « semble très probable » qu'un corps soit caché dans tel endroit, mais elle ne fait que parier en fonction des éléments dont elle dispose ; en progressant, l'enquête révélera le lieu où se trouve le corps et la probabilité est donc de un ou zéro. C'est à ce genre d'estimations que procèdent les physiciens quand ils se prononcent sur un événement inédit ou envisagent un procédé encore mal appréhendé : c'est une probabilité bien informée (parfois très), bien

étayée par des théories parfaitement établies, mais néanmoins susceptible d'être modifiée à la lumière d'intuitions ou d'éléments nouveaux.

Notre « dernière » expérience ?

Le but des physiciens est de comprendre les particules qui constituent le monde et les forces qui les gouvernent ; pour obtenir les énergies, les pressions et les températures les plus extrêmes, ils se servent d'accélérateurs de particules. Ces machines permettent de produire une concentration d'énergie intense en accélérant de façon prodigieuse la vitesse des atomes et en les précipitant les uns contre les autres. Il vaut mieux utiliser des atomes très lourds, comme l'or, par exemple, dont la masse est près de deux cents fois celle d'un atome d'hydrogène ; un noyau de plomb est encore plus lourd. Quand deux atomes de ce type entrent en collision, les protons et les neutrons dont ils sont constitués implosent à une densité et une pression bien supérieures que lorsqu'ils étaient enveloppés dans un noyau normal d'or ou de plomb. Ils peuvent ensuite se briser en particules encore plus petites. Théoriquement, chaque proton et chaque neutron est constitué de trois quarks ; le « choc » dû à la collision produit donc plus d'un millier de quarks. Un accélérateur de particules reproduit, à très petite échelle, les conditions qui prévalaient lors des premières microsecondes suivant le « Big Bang », lorsque toute la matière de l'univers s'est agrégée et qu'il est passé de l'opacité à la lumière.

Selon certains physiciens, ces expériences pourraient provoquer bien plus qu'une explosion de quelques

atomes et aller jusqu'à détruire la Terre ou même tout l'univers. C'est de cela qu'il est question dans *COSM*, le roman de Greg Benford, où une expérience menée au laboratoire de Brookhaven⁴ anéantit l'accélérateur et crée un micro univers nouveau (heureusement contenu dans une sphère assez petite pour que son propriétaire puisse la transporter avec lui).

Une expérience produisant une concentration jamais vue d'énergie pourrait – même si cela est très improbable – déclencher trois scénarios catastrophes tout à fait différents.

Premier scénario : un trou noir se forme et aspire tout ce qui l'entoure. Selon la théorie de la relativité d'Einstein, l'énergie requise pour produire ne serait-ce qu'un minuscule trou noir est bien supérieure à celle qu'engendrerait une telle collision. Mais selon certaines nouvelles théories, des dimensions extra-spatiales existeraient en plus des trois que nous connaissons⁵ ; dans ce cas, l'attraction gravitationnelle s'en trouverait augmentée et un petit objet implorerait difficilement dans un trou noir. Ces mêmes théories suggèrent néanmoins que ces trous resteraient inoffensifs car ils se désintégreraient presque immédiatement, au lieu d'absorber ce qui les entoure.

Deuxième scénario : les quarks s'agrègent en un objet très compact appelé strangelet. Phénomène inoffensif en soi, car le strangelet serait toujours bien plus petit qu'un atome. Le danger résiderait dans la capacité du strangelet à transformer tout ce qu'il croise en une autre matière. Dans *Le Berceau du chat*⁶, roman de Kurt Vonnegut, un chercheur du Pentagone crée une nouvelle forme de glace appelée « ice nine », qui, à température ambiante, reste solide ; cette glace sort du laboratoire, « infecte » l'eau et solidifie jusqu'aux océans. Une

catastrophe provoquée par un strangelet pourrait ainsi transformer la planète en une sphère inerte et hyper dense d'une centaine de mètres de diamètre.

Le troisième scénario, encore plus étonnant, est potentiellement le plus dangereux : une catastrophe non seulement terrestre mais cosmique, où l'espace lui-même est englouti. L'espace vide – « l'espace sans air », comme disent les physiciens – est plus que du néant ; c'est là que tout se passe, car il contient l'ensemble des forces et des particules qui gouvernent le monde physique. Certains physiciens pensent que l'espace peut adopter différentes « formes successives », comme l'eau peut exister sous forme de glace, de liquide et de vapeur. Le vide dont nous parlons pourrait aussi être fragile et instable, comme de l'eau « hyper refroidie ». De l'eau très pure et statique peut être refroidie en dessous de son point de congélation, mais il suffit d'un infime mouvement bien précis – provoqué par un grain de poussière par exemple – pour que cette eau hyper refroidie se transforme en glace. De même, certains pensent que l'énergie concentrée due à la collision des particules pourrait déclencher une « transition momentanée » qui déchirerait la matière de l'espace elle-même. Les bords de ce vide nouvellement créé s'étireraient alors à la façon d'une bulle qui enfle. A l'intérieur, les atomes ne pourraient pas exister : rideau ! pour nous, pour la Terre et pour le cosmos car, pour finir, la Galaxie tout entière se trouverait engloutie. Nous ne serions donc jamais témoins de cette catastrophe et, la « bulle » de vide progressant à la vitesse de la lumière, nous n'aurions pas le temps de comprendre ce qui nous arrive.

Ces scénarios peuvent sembler fantaisistes, mais les physiciens en discutent très sérieusement. Les scénarios

rassurants ont leur préférence car ils impliquent un risque nul, mais dont on ne peut pas être absolument sûr. Quels que soient les scénarios imaginés par les spécialistes, chacun d'eux peut se réaliser, et ce n'est pas parce qu'ils sont improbables qu'ils sont impossibles.

Lors de mon passage à l'institut d'études avancées de Princeton, j'ai évoqué ces problèmes avec un collègue hollandais, Piet Hut. Nous sommes tombés d'accord sur le fait qu'une des façons de vérifier si une expérience est sans danger serait de chercher à savoir si elle est déjà advenue dans la nature. Il s'avéra que des collisions similaires à celles envisagées par les scientifiques étaient choses courantes dans l'univers. Le cosmos est en effet plein de particules connues sous le nom de rayons cosmiques, qui traversent l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière et entrent régulièrement en collision avec des noyaux atomiques, bien plus violemment qu'en laboratoire. Hut et moi en avons conclu⁷ que l'espace n'est pas fragile au point de pouvoir être déchiré par quoi que ce soit résultant d'expériences en accélérateurs. Si c'était le cas, l'univers n'aurait pas duré assez longtemps pour nous permettre d'être là. Cependant, si nous avions les moyens financiers de fabriquer des accélérateurs cent fois plus puissants, nous aurions des raisons de nous inquiéter – sauf à ce que, d'ici là, nos connaissances aient progressé au point que nous puissions prédire plus sûrement les choses grâce aux seules théories, sans recourir aux expériences⁸.

Récemment, les vieilles peurs ont refait surface quand le laboratoire américain de Brookhaven et le CERN à Genève annoncèrent qu'ils envisageaient de procéder à des collisions d'atomes à des puissances encore jamais vues. Un groupe d'experts effectua des

calculs en raisonnant comme Hut et moi l'avions fait et en conclut que la destruction du cosmos ne pouvait être provoquée par la mise en pièces de la matière spatiale.

Ils ne purent cependant être aussi rassurants quant aux risques liés aux strangelets. Des collisions semblables à celles produites en laboratoire adviennent sans aucun doute dans l'espace, mais dans des conditions différentes, susceptibles de modifier les probabilités de catastrophe.

La plupart des collisions cosmiques « naturelles » adviennent dans l'espace interstellaire, où l'air est si raréfié que même un strangelet né du choc aurait peu de chance de rencontrer un troisième nucléus et donc de provoquer un désastre. Les collisions avec la Terre adviennent aussi autrement qu'en accélérateur, car les nucléus qui se dirigent sur la planète sont stoppés dans l'atmosphère, qui ne contient pas d'atomes lourds comme le plomb et l'or.

Certains noyaux atomiques rapides frappent cependant directement la surface solide de la Lune, qui, elle, contient ce type d'atomes. Ces impacts ont lieu depuis que la Lune existe, pourtant, celle-ci est toujours là. Mais les conditions dans lesquelles ils adviennent diffèrent aussi de celles des expériences en laboratoire. Quand une particule rapide frappe la surface lunaire, qui est presque statique, la particule subit un « coup » et a un mouvement de recul ; les débris dus à la collision, ou strangelets, vont accuser ce mouvement de recul et donc être projetés dans la matière lunaire. En laboratoire, deux particules se fracassent « de front », il n'y a donc pas de mouvement de recul : les strangelets ne subissent pas de

mouvement net et ont donc plus de chances de rencontrer la matière ambiante.

Puisque l'expérience en laboratoire et ce qui se passe dans la nature ne permet pas de tirer des conclusions définitives, on se rassure grâce à deux arguments théoriques. Premièrement, même si les strangelets pouvaient exister, ils ne se formeraient probablement pas dans des conditions aussi violentes ; au lieu de s'amalgamer en un seul agrégat, ces débris se disperseraient après la collision. Deuxièmement, s'il y avait formation de strangelets, leur charge électrique serait probablement positive ; or, pour déclencher un agrégat incontrôlable, ils doivent être chargés négativement (pour attirer les nucléus atomiques positifs).

Les meilleurs paris théoriques sont donc rassurants. Comme l'ont résumé le théoricien Sheldon Glashow et l'expert en matière d'énergie et d'environnement Richard Wilson⁹ : « Si les strangelets existaient (ce qui n'est pas inconcevable), s'ils pouvaient former des agrégats raisonnablement stables (ce qui est peu probable), s'ils sont chargés négativement (bien que la théorie favorise fortement dans leur cas une charge positive), et si le fracas d'atomes [de Brookhaven] était capable de créer de tels petits agrégats (ce qui est extrêmement improbable), alors, il pourrait y avoir un problème. Un strangelet nouveau-né pourrait avaler des noyaux atomiques les uns après les autres, grossissant sans cesse et finalement avalant la Terre entière. Le mot "improbable", même répété plusieurs fois, ne suffit certainement pas à apaiser nos craintes face à l'hypothèse d'un désastre aussi total. »

Quels sont les risques acceptables ?

Les expériences en accélérateur de particules ne m'ont pas empêché de dormir et aucun physicien de ma connaissance n'exprime jamais la moindre angoisse à leur sujet. Cependant, ces attitudes sont purement subjectives et reposent sur des connaissances bien spécifiques ; comme le disent clairement Glashow et Wilson, l'argumentation théorique dépend de probabilités plus que de certitudes. Nous n'avons pas de preuves que les phénomènes se passent dans la nature comme en laboratoire et ne pouvons donc pas être absolument certains que les strangelets ne pourraient pas mener à un désastre.

Les expériences menées au laboratoire de Brookhaven et au CERN¹⁰ sont rassurantes. Cependant, même si l'on accepte d'être rassurés les yeux fermés, les garanties offertes laissent un peu à désirer. Elles tablent sur une expérience de dix ans, où le risque de catastrophe ne serait pas supérieur à un sur cinquante millions : pari assez étonnant, dont la probabilité de catastrophe est inférieure aux chances de gagner à la loterie avec un seul billet, c'est-à-dire une sur quatorze millions. Il y a disproportion entre le danger potentiel – la destruction de la population mondiale – et l'avantage – l'apport de connaissances à la science « pure » – donc, la garantie que l'on nous propose n'est pas suffisante. La gravité d'un danger se mesure ainsi : on procède à une estimation du « nombre supposé » de morts en multipliant la probabilité de danger par le nombre d'individus menacés – ici, la population mondiale. Les experts nous disent donc que le nombre supposé de morts pourrait s'élever à 120 (six milliards d'êtres humains divisé par cinquante millions).

Evidemment, personne n'est d'accord pour entreprendre une expérience susceptible de faire 120 morts. Mais ceci n'est pas tout à fait ce qu'on nous propose. Ce qu'on nous dit, c'est que le risque de tuer six milliards d'humains n'est que de un sur cinquante millions : est-ce plus acceptable ? Pour la plupart d'entre nous, je ne pense pas, car les risques que nous acceptons sont ceux auxquels nous nous exposons volontairement ou bien ceux où nous avons quelque chose à gagner. Or, ni l'une ni l'autre de ces propositions ne s'applique ici (sauf pour les physiciens, susceptibles d'apprendre quelque chose de l'expérience).

Mon collègue de Cambridge Adrian Kent attire l'attention sur un deuxième problème : le caractère irréversible de l'extinction éventuelle qu'impliquerait ce scénario. Cette catastrophe nous priverait en effet de l'espoir – important pour la plupart des humains – de laisser derrière nous un patrimoine biologique ou culturel, annulant ainsi la chaîne de progrès ininterrompue de nos vies et de notre travail. Pire encore, cette extinction effacerait l'existence de l'humanité pour toutes les générations à venir. On peut donc considérer que la disparition de la totalité de la population mondiale et celle de la biosphère sont bien plus graves que la mort d'une seule personne. Peut-être faudrait-il donc fixer des limites plus rigoureuses à certaines expériences avant de les autoriser.

Les philosophes débattent depuis longtemps de la façon d'équilibrer les droits et les intérêts des individus à venir « éventuellement » et ceux des êtres existant actuellement. Pour certains, comme Schopenhauer, l'élimination indolore du monde ne serait pas une mauvaise chose du tout, mais la plupart diraient plutôt, avec

Jonathan Schell, que : « S'il est vrai que l'extinction ne peut être vécue par ceux dont elle constitue le destin – les non-nés, qui le restent – on ne peut pas en dire autant du contraire de l'extinction qu'est la survie. Si l'on maintient les non-nés hors de la vie, ils ne pourront jamais pleurer sur eux-mêmes, mais si on leur permet d'être en vie, ils auront d'amples raisons de se réjouir d'être nés plutôt que d'avoir été tués avant la naissance. Ce qu'il faut avant tout désirer est qu'ils naissent, pour leur propre bien et rien d'autre. Tout le reste – notre souhait d'aider les générations futures en leur préparant un monde viable, et notre désir de mener pour nous-mêmes une vie satisfaisante dans un monde solidaire que nous préservons pour les générations futures – découle de cet engagement. La vie est prioritaire, le reste est secondaire¹¹. »

Qui doit décider ?

La décision d'entreprendre une expérience impliquant un risque de fin du monde ne devrait être prise que si le public ou son représentant avait la garantie que le risque est inférieur à ce qu'il considère comme une limite acceptable. Concernant l'expérience dont il est question ici, les théoriciens semblent avoir tenté de rassurer le public au lieu d'établir une analyse objective.

Francesco Calogero, physicien mais aussi, et depuis longtemps, militant du contrôle de l'armement et ancien secrétaire des conférences de Pugwash, est un des rares chercheurs à s'être vraiment interrogés à ce sujet. « Ce qui me dérange un peu, dit-il, c'est ce que je perçois comme un manque d'honnêteté quand il est question de

ces problèmes... En fait, la plupart [de ceux avec lesquels j'ai échangé] semblent plus soucieux de la façon dont le public réagit à ce qui se dit et s'écrit que de s'assurer que les faits en question sont décrits en toute objectivité scientifique¹². »

Comment la société peut-elle éviter d'être sans le savoir exposée au risque, même minime, d'une catastrophe terminale ? Pour Calogero, une telle expérience ne devrait être approuvée qu'après un exercice de simulation, avec une « équipe d'alerte » constituée d'experts (hors ceux impliqués dans l'expérience), qui joueraient les avocats du diable, et une « équipe médicale » dont le rôle serait d'imaginer des contre-arguments ou des antidotes.

Quand il s'agit de tester des conditions physiques « extrêmes » en terrain peu connu, il est difficile d'en écarter tous les risques éventuels, et il est impossible de quantifier la probabilité d'une catastrophe de façon crédible.

A supposer que l'on y parvienne, reste à connaître le seuil de risque minimum à partir duquel l'expérience est dûment autorisée. Pour certains, le ratio serait de un sur cinquante millions, car il est inférieur au risque qu'un astéroïde ne dévaste le monde pendant l'année en cours. Ce seuil est cependant encore trop élevé car, si on peut se résigner à un risque de catastrophe naturelle (impact d'astéroïde ou polluants naturels par exemple), personne n'est censé accepter un danger de même ampleur mais tout à fait évitable. Donc, quand c'est possible, on essaie de réduire encore ce seuil.

En Angleterre, le risque de mourir des effets des radiations couru par les seuls employés d'une centrale nucléaire ne doit pas être supérieur à une chance sur cent

mille par an. Si ce critère extrêmement rigoureux était appliqué à l'expérience en accélérateur, on exigerait d'être certain que les chances de catastrophe soient inférieures à une sur mille milliards (10^{-15}). Si l'on prêtait autant d'importance aux vies de tous les individus – position philosophiquement controversée, bien sûr – alors on pourrait même dire que le seuil de risque acceptable est encore un million de fois inférieur.

Le prix caché du refus de prise de risques

Ceci mène à un dilemme. Le plus prudent serait d'interdire toute expérience susceptible de créer de nouvelles conditions artificielles (sauf à ce que celles-ci soient préalablement advenues quelque part dans la nature). Mais la science serait alors complètement paralysée. Il est évident que la création d'un nouveau type de matière – un matériau chimique, par exemple – n'a pas à être interdite dans la mesure où nous sommes, dans ce cas, absolument certains d'appréhender les principes scientifiques de base. Mais, une fois atteinte la limite du danger – comme pour l'expérience en accélérateur, où les noyaux atomiques se fracassent en éléments que l'on ne connaît pas bien –, il faudrait peut-être réfléchir.

Un certain nombre d'expériences auraient déjà dû inspirer plus de vigilance. Par exemple, les laboratoires utilisent des réfrigérateurs fonctionnant à l'hélium liquide pour obtenir des températures à près d'une fraction de degré du zéro absolu (-273 degrés centigrades). Or, probablement rien, nulle part dans la nature, n'est aussi froid, la température étant partout de trois degrés au-dessus de zéro, trace de la forte température qui

régnait lors des débuts de l'univers. N'aurait-on pas dû réfléchir à deux fois avant de mettre le premier de ces réfrigérateurs en marche ?

A mon avis, oui. Certes, rien ne signalait alors un danger potentiel. Mais peut-être manquait-on d'imagination, car selon certaines théories actuelles (très improbables, il est vrai), le risque existe ; mais lorsque furent obtenues les premières températures ultra basses, de nombreux doutes persistaient et les physiciens n'étaient pas en mesure d'affirmer que la probabilité de danger était inférieure à une sur un milliard de milliards.

Lorsque l'on décide d'expérimenter pour la première fois ce qui nous entoure, il faut se demander si nos connaissances permettent d'affirmer que l'expérience ne comporte pas de risque inquiétant. On ne peut, à ce propos, qu'approuver Adrian Kent, selon lequel : « Le problème consistant à décider de ce qui constitue un risque acceptable dépend des seuls critères personnels de ceux auxquels il est posé. Ceci est de toute évidence insatisfaisant car, tout sincères et rationnels qu'ils soient, ces critères ne sont pas toujours ceux de l'opinion publique¹³. »

Les expériences dont le seul but est de satisfaire notre curiosité face à la nature devraient se conformer à des critères de sécurité très stricts. Le public peut, certes, approuver que d'autres prennent à sa place la décision de se livrer à des expériences dont l'enjeu est capital. Mettre fin à la Seconde Guerre mondiale, par exemple, était sans doute le but de Hans Bethe et Edward Teller lorsqu'ils tentaient de savoir si la première bombe atomique ferait exploser l'atmosphère. Cet enjeu majeur aurait justifié qu'ils entreprennent l'expérience en l'absence de garanties absolues de sécurité.

Les expériences relatives aux accélérateurs de particules mettent en lumière la question qui se posera de plus en plus souvent dans d'autres domaines scientifiques : qui (et de quelle façon) doit décider d'entreprendre une expérience dont on peut attendre un résultat désastreux même hautement improbable ? Ces expériences sont l'illustration extrême de ces situations à double tranchant. Le cas, précédemment mentionné, de la variole de la souris en Australie montre à une moindre échelle ce qui arriverait si un dangereux agent pathogène était involontairement créé et lâché dans la nature. Plus tard au cours de ce siècle, il se pourrait que des micro-machines non biologiques soient aussi dangereuses que des virus nocifs, tout comme le scénario « grey goo » pourrait sortir du domaine de la science-fiction.

Le « côté sombre » de l'expérience biologique la plus dangereuse qui puisse être imaginée n'aurait pas le pouvoir de destruction de l'expérience en accélérateur, la Terre n'étant pas menacée. Mais dans les domaines de la biologie et de la nanotechnologie, les expériences sont à plus petite échelle et peuvent donc être entreprises bien plus souvent et de façon beaucoup plus diversifiée. Il nous faut donc avoir la garantie qu'aucune d'elles n'aura des conséquences funestes.

Entre autres méthodes d'évaluation des risques, il en est une dont les résultats ne justifient pas l'optimisme qu'ils inspirent. Un accident majeur – d'avion ou d'engin spatial, par exemple – peut advenir de plusieurs façons, chacune impliquant des problèmes en série. Les chances de se prémunir contre chacun sont donc combinées, un peu comme on multiplie ses chances en pariant sur une combinaison de chevaux gagnants. En procédant ainsi, on risque de ne pas tenir compte de certaines pannes ;

cette méthode offre donc peu de garantie. La sécurité de la navette spatiale était considérée comme suffisante pour que les risques courus par les astronautes soient estimés inférieurs à un sur mille – mais l'explosion de 1987 a eu lieu lors du vingt-cinquième vol : avec le recul, il aurait mieux valu tabler sur un risque d'accident sur vingt-cinq. Les pannes susceptibles d'advenir dans les centrales nucléaires sont estimées de la même façon, il faut donc prendre les estimations avec prudence.

Pour jauger un moindre risque touchant la Terre, on multiplie une probabilité infime par un nombre colossal, de l'ordre du pire des impacts d'astéroïdes sur l'échelle de Turin. La probabilité n'est jamais nulle, car notre connaissance fondamentale en matière de physique de base est incomplète ; mais même si cette probabilité était très mince, sa multiplication par un nombre énorme donnerait un résultat justifiant qu'on s'en inquiète.

Le pouvoir croissant de la science me semble provoquer des risques plus variés et plus fréquents. Même si chacun d'eux est insignifiant, l'ensemble, cumulé, peut constituer un danger important. Alors, en cas de catastrophe, non seulement sur les accélérateurs de particules mais en matière de génétique, de robotique et de nanotechnologie, les savants sont-ils en mesure de rassurer le public à cent pour cent, comme celui-ci l'exige ? Quelles doivent être les recommandations concernant ces expériences, qui doit les formuler et surtout, comment seront-elles appliquées ?

10.

Les philosophes de l'Apocalypse

*La pensée pure peut-elle nous dire
si les jours de l'humanité sont comptés ?*

Les philosophes suggèrent parfois des propositions non dénuées d'intérêt ; elles trouvent grâce aux yeux de certains quand d'autres n'y voient que des jeux de mots ou d'esprit, sans bien savoir pourquoi. Mon collègue et ami Brandon Carter en a avancé une en 1983 qui, bien qu'appartenant à la deuxième catégorie, a fait couler pas mal d'encre. Son idée, présentée à la Royal Society de Londres devant un auditoire de savants perplexes, n'était en fait qu'une réflexion au détour d'un exposé consacré aux possibilités de vie sur des planètes orbitant d'autres étoiles. La conclusion de Carter était que la vie intelligente était rare ailleurs que sur Terre, et que, même dans l'hypothèse d'un Soleil brillant encore pendant des

milliards d'années, l'avenir à long terme de la vie s'annonçait sombre¹.

Cet « argument de l'Apocalypse² » se fonde sur une sorte de « principe de Copernic » ou « principe de médiocrité » appliqué à notre position dans le temps. De même que, depuis Copernic, nous nous dénichons tout rôle géocentrique dans l'univers, de même, selon Carter, il serait erroné de croire que nous vivons dans un temps spécifique de l'histoire de l'humanité, ou que nous sommes les premiers ou les derniers de notre espèce. Considérons notre emplacement dans la « descendance » de *l'homo sapiens*. Nous n'en sommes pas très sûrs, mais la plupart des estimations indiquent que nous aurions été précédés par soixante milliards d'êtres humains. Il ressort de cela que dix pour cent des individus ayant jamais vécu sont en vie aujourd'hui – ce qui semble beaucoup, étant donné que l'humanité s'étend sur des milliers de générations. Mais pendant la plus grande partie de son histoire – c'est-à-dire l'ère pré-agricole, probablement 8 000 ans avant J.-C. –, moins de dix millions de personnes vivaient sur Terre ; pendant l'ère romaine, la population mondiale était d'environ trois cents millions et n'a atteint le milliard qu'au XIX^e siècle. Le nombre de morts n'est donc que de dix pour cent supérieur à celui des vivants.

Voyons maintenant les deux scénarios relatifs à l'avenir de l'humanité. Selon l'un, « pessimiste », notre espèce disparaît en un ou deux siècles (si elle survit au-delà, nous sommes très peu nombreux) et la population mondiale est de cent milliards maximum. Selon l'autre, « optimiste », l'humanité survit pendant plusieurs milliers d'années avec une population au moins égale à celle d'aujourd'hui (ou s'étend bien au-delà de

la Terre et augmente à l'infini), de sorte que trois mille milliards d'individus sont à venir. Selon Brandon Carter, le « principe de médiocrité » doit nous inciter à parier sur le scénario « pessimiste ». Notre emplacement dans la descendance de l'humanité (nous en sommes à peu près à mi-chemin) est donc tout à fait logique et peu surprenant. Alors que selon le scénario « optimiste », où une population élevée perdure à très long terme, ceux qui vivent au XXI^e siècle sont les premiers dans la descendance humaine.

Cet argument se fonde sur une simple analogie. Imaginez-vous face à deux urnes identiques. L'une, vous indique-t-on, ne contient que dix tickets, numérotés de 1 à 10, l'autre en contient mille, numérotés de 1 à 1 000. Vous choisissez une des deux urnes et en sortez un ticket ; il se trouve que c'est le numéro 6. Vous allez sûrement en déduire que vous avez pris ce ticket dans l'urne qui n'en contenait que dix, car il serait très étonnant de tirer un ticket portant un chiffre aussi bas que 6 de l'urne contenant mille tickets. En fait, vous aviez certes autant de chances, a priori, de vous servir indifféremment dans l'une ou l'autre des deux urnes, mais un simple calcul de probabilité montre que, maintenant que vous avez tiré le ticket numéro 6, les chances que vous l'ayez pris dans l'urne contenant dix tickets ne sont plus que de cent contre une.

Selon ce raisonnement, Carter soutient que notre place connue dans la chaîne de l'évolution humaine (environ soixante milliards d'humains nous ont précédés) penche en faveur de l'hypothèse selon laquelle il n'existera que cent milliards d'humains, et non cent mille milliards. Donc, la population mondiale ne peut perdurer longtemps à son niveau : elle va décroître progressive-

ment et perdurer à un niveau bien inférieur au niveau actuel, ou bien être détruite par une catastrophe d'ici quelques générations.

Un argument encore plus simple est avancé depuis trente ans par Richard Gott³. Cet enseignant à l'université de Princeton est animé d'intuitions un peu loufoques mais intéressantes sur les voyages plus rapides que la lumière, les machines à remonter le temps, etc. Selon lui, si nous rencontrons tel objet ou tel phénomène, nous avons peu de chances de le faire au début ou à la fin de la vie de cet objet ou de ce phénomène. On peut donc présumer que quelque chose d'ancien durera longtemps et que quelque chose de récent devrait avoir une durée de vie courte. Gott se rappelle, par exemple, être allé, en 1970, voir le Mur de Berlin (alors construit depuis douze ans) et les pyramides d'Égypte (vieilles de plus de quatre mille ans) ; selon son raisonnement, les pyramides devaient être encore là au XXI^e siècle et il aurait été surprenant que le Mur de Berlin le soit encore – et comme on le sait, il n'est effectivement plus là.

Souhaitant démontrer que cet argument s'applique aux spectacles de Broadway, il fit une liste de toutes les pièces et comédies musicales à l'affiche à une date donnée (le 27 mai 1993) et chercha depuis combien de temps chacune était sortie. Sur cette base, il prédit que celles qui étaient à l'affiche depuis le plus longtemps y seraient encore dans l'avenir : *Cats* existait alors depuis 10,6 ans et resta à l'affiche sept ans de plus ; la plupart des autres spectacles, alors à l'affiche depuis moins d'un mois, en disparurent au bout de quelques semaines.

La plupart d'entre nous auraient bien sûr pu prédire la même chose sans nous aider de cet argument, mais en nous reposant sur nos rudiments d'histoire, notre

connaissance de la société américaine, de l'économie du théâtre, en misant sur la solidité et la durée des artefacts, etc. ; car plus nous possédons d'informations, plus nos prévisions sont fiables. Mais même un extra-terrestre nouveau venu, dépourvu de ces informations de base et ne connaissant que le temps qu'ont duré ces spectacles, aurait pu user de l'argument de Gott et faire des prévisions peu précises mais correctes. Pour en revenir à la durée future de l'humanité, nous sommes aussi ignorants à ce sujet qu'un Martien le serait quant aux spectacles de Broadway. Pour Gott, comme pour Carter, ce raisonnement peut donc nous donner une idée – certes peu réjouissante – de la longévité probable de notre espèce.

Celle-ci ne peut évidemment pas être réduite à une simple démonstration mathématique et dépend de nombreux autres facteurs, en particulier – et c'est l'un des thèmes du présent ouvrage – des choix que nous ferons au cours de ce siècle. Pour le philosophe canadien John Leslie⁴, l'argument de l'Apocalypse a néanmoins du poids et devrait nous rendre moins optimistes quant à notre avenir à long terme. Si l'on pense que l'humanité perdurera a priori pendant des millénaires avec une population élevée, alors l'argument de l'Apocalypse va nous faire douter – sans pour autant nous faire abandonner ce scénario. Ceci s'explique en appliquant l'exemple de l'urne. Supposez qu'au lieu de deux urnes, il y en ait des millions ; chacune contient mille tickets, à l'exception d'une, qui n'en contient que dix. En choisissant une urne au hasard, vous serez surpris de tirer le numéro 6. Mais s'il y avait des millions d'urnes contenant chacune des milliers de tickets, alors tirer de l'une d'elles un nombre exceptionnellement bas serait moins surprenant que tomber sur la seule urne ne contenant que dix tickets.

De même, si la probabilité a priori donne nettement l'avantage à un avenir humain de longue durée, alors la thèse selon laquelle « l'apocalypse est pour bientôt » pourrait être moins improbable que le fait de nous trouver les premiers dans la chaîne de l'évolution humaine.

John Leslie peut ainsi résoudre un autre problème qui semble à première vue discréditer tout ce raisonnement. Supposons que nous devions prendre une décision cruciale dont dépendrait la destruction prochaine de l'espèce humaine ou sa survie quasi infinie ; par exemple, choisir entre créer ou non la première communauté ailleurs que sur Terre, laquelle, une fois établie, se reproduirait assez pour assurer la survie de l'humanité. Le cas échéant, nous serions, actuellement, aux tout débuts de la chaîne. L'argument de l'Apocalypse nous incite-t-il au choix d'un avenir humain écourté ? Nous sommes libres de choisir, dit John Leslie, mais notre décision concernant la première proposition des deux scénarios sera déterminante.

L'autre question que l'on peut se poser est celle de la définition de l'humanité : qui ou quoi dénombrer ? Ne parlons pas de la destruction de toute la biosphère en cas de catastrophe planétaire, puisque alors, on sait d'avance quand finirait la chaîne humaine. Mais qu'advierait-il si notre espèce se transformait en autre chose : serait-ce toujours la fin de l'humanité ? Si tel était le cas, l'argument de Carter et Gott rejoindrait Kurzweil, Moravec et d'autres, qui prédisent que les machines auront la « mainmise » sur nous au cours de ce siècle capital.

Supposons maintenant l'existence d'autres êtres dans d'autres mondes : tous les êtres intelligents, et pas seulement humains, devraient-ils faire partie du « classement de référence » ? Nous n'avons aucun moyen de

quantifier la chaîne de l'évolution humaine, et l'argument de l'Apocalypse s'effondre. La première fois que j'ai entendu parler de celui-ci, j'ai songé au commentaire sans appel émis par George Orwell dans un contexte différent : « Il faut vraiment être un intellectuel pour avoir ce genre de préoccupations – personne d'autre n'irait chercher des idées pareilles. » Mais mettre le doigt sur un problème évident n'est pas inutile, et vaut d'autant plus la peine qu'aucun de nous n'est prêt à admettre la possibilité que nos jours soient comptés.

La fin de la science ?

Il se peut que les théories actuelles sur l'espace, le temps et les mondes infiniment petits soient un jour prouvées par de futurs Einstein. Mais les sciences holistiques soulèvent des questions sur les mystères et la complexité de la vie auxquelles l'esprit humain ne sera peut-être jamais en mesure de répondre.

La science est-elle amenée à poursuivre ses avancées et à faire naître de nouvelles intuitions, ou, s'arrêtant aux succès atteints, à régresser au siècle prochain ?

Le journaliste John Horgan parie sur la seconde proposition¹, arguant du fait que toutes les grandes idées ont d'ores et déjà été émises et qu'il ne reste qu'à en fignoler les détails, sinon, dit-il, nous tomberons dans la « science fantaisiste », jouant avec des conjectures excentriques et mal cadrées autour de sujets qui n'auront

rien à voir avec l'étude empirique sérieuse. Je trouve cette façon de voir fondamentalement erronée et je pense que des idées aussi révolutionnaires que celles émises au ^{xx}e siècle restent à découvrir. Isaac Asimov a un point de vue plus séduisant, qui compare la frontière de la science à un fractal – cette structure formée de couches empilées les unes sur les autres qui fait qu'une fois grossie, une partie infime est une représentation du tout : « Quelle que soit l'ampleur de nos connaissances, le peu que nous ignorons peut-être encore est aussi complexe que tout ce que nous avons appris². »

Les progrès accomplis au ^{xx}e siècle en matière de compréhension des atomes, de la vie et du cosmos constituent le plus grand patrimoine intellectuel commun, et j'insiste sur l'importance du terme « commun ». Les savants ont chacun leur personnalité marquante mais il est rare que le travail d'un seul soit prépondérant à long terme : si tel d'entre eux ne l'effectue pas, tel autre le fera un jour ; c'est ainsi que la science progresse. Le cas du grand savant que fut Einstein est une exception qui confirme cette règle, car s'il n'avait pas existé, ses intuitions de génie auraient vu le jour bien plus tard, différemment peut-être mais grâce aux efforts de plusieurs individus et non d'un seul. Aucun scientifique, pas même Einstein, ne laisse une empreinte personnelle comme le fait un grand écrivain ou un grand compositeur.

Depuis l'ère grecque classique où l'on croyait que le monde était constitué de terre, d'air, de feu et d'eau, les savants cherchent à « unifier » l'ensemble des formes de la nature et à comprendre le mystère de l'espace. On reproche souvent aux astrophysiciens d'être « souvent dans l'erreur mais jamais dans le doute », et il est vrai qu'ils s'emballent souvent pour des spéculations parfois

peu fondées. Il n'empêche que les plus circonspects d'entre nous savent que nous comprenons d'ores et déjà le cosmos dans ses grandes lignes et ce dont il est fait.

Il reste au ^{xxi}e siècle d'affiner ces connaissances, d'en déceler les détails manquants, comme des générations d'arpenteurs l'ont fait pour la Terre, et surtout de sonder les endroits mystérieux de la carte du ciel où les premiers chercheurs ont noté : « Ici, il doit y avoir des dragons. »

Des paradigmes fluctuants

C'est Thomas Kuhn qui, dans son ouvrage *The Structure of Scientific Revolution*, a popularisé le terme de « paradigme ». Un paradigme n'est pas seulement une nouvelle idée – si c'était cas, la plupart des scientifiques pourraient se targuer d'en avoir trouvé quelques-uns. Un mouvement paradigmatique est une avancée intellectuelle qui donne lieu à de nouvelles intuitions et transforme les perspectives de la science. Le plus grand paradigme du ^{xx}e siècle est la théorie quantique³ qui, à l'encontre de toutes les intuitions, suggère que sur l'échelle atomique, la nature est intrinsèquement « floue » mais que les atomes se comportent de façon très mathématique quand ils émettent et absorbent la lumière ou s'assemblent pour former des molécules. Comme le fait remarquer Stephen Hawking, « ce qui fait honneur aux connaissances que nous avons acquises en matière de physique théorique est qu'aujourd'hui, il faut d'énormes machines et beaucoup d'argent pour parvenir à faire une expérience [sur les particules subatomiques] dont nous ne pouvons prévoir le résultat⁴ ».

La théorie quantique se justifie chaque fois que nous prenons une photo numérique, que nous surfons sur le web ou que nous utilisons un gadget – support de CD ou code-barre – impliquant le laser, dont les fabuleuses applications ne cessent de nous émerveiller. Celui-ci est à l'origine d'ordinateurs de conception tout à fait innovante et dont le fonctionnement surpasse celui des ordinateurs « classiques », même s'ils ne font pas mentir la loi de Moore.

Un des paradigmes, ou autre bond intellectuel étonnant, qui ont marqué le xx^e siècle est l'œuvre d'un homme, Albert Einstein, dont la théorie de la Relativité générale a affiné notre compréhension de l'espace, du temps et de la gravité. Cette théorie a été confirmée⁵ par le tracé au radar très précis des planètes et de la matière de l'espace et par l'étude des étoiles de neutron et des trous noirs – objets où la pesanteur est telle que l'espace et le temps en sont grossièrement déformés. La théorie d'Einstein, tout obscure qu'elle ait pu paraître, se vérifie chaque fois qu'un camion ou qu'un avion peut être localisé grâce au système de positionnement par satellite (GPS).

Lier le très grand et le très petit

La théorie d'Einstein est cependant incomplète par nature ; elle traite en effet l'espace et le temps comme un continuum lisse. Or, si l'on coupe par exemple un morceau de métal (ou d'une autre matière) en des fragments de plus en plus petits, on finit par atteindre la limite finale, le niveau quantique des atomes individuels : comme le métal, l'espace et même le temps doivent être

constitués de quantas finis au lieu de « flotter » sans fin. En l'état actuel, ni la théorie d'Einstein ni celle des quantas ne sont en mesure de nous dire ce qu'est la microstructure de l'espace et du temps⁶. Cette énigme de taille a été laissée en suspens par la science du xx^e siècle et il incombe au xxi^e siècle d'en relever le défi⁷.

L'histoire de la science semble indiquer que lorsqu'une théorie s'effondre ou est confrontée à un paradoxe, sa résolution future constituera un nouveau paradigme qui sera un bond en avant par rapport au précédent. Il ne faut pas mélanger la théorie d'Einstein et la théorie quantique qui, bien qu'étant toutes deux superbes malgré leurs limites, se contredisent finalement ; à moins d'en faire une synthèse, nous ne saurons sans doute jamais ce qui s'est passé au tout début de l'Univers et pourrons encore moins donner un sens à cette question : « Que s'est-il passé avant le Big Bang ? » A l'« instant » du Big Bang, tout a été compressé en quelque chose de plus petit qu'un seul atome, et les fluctuations quantiques ont pu secouer l'univers tout entier.

Selon la théorie des supercordes⁸, actuellement très près d'être considérée comme une théorie unifiée, les particules qui constituent les atomes participent toutes de l'espace lui-même. Les objets de base ne sont en effet pas des points mais de minuscules boucles, ou « cordes », et les différentes particules subnucléaires sont des modes de vibration différents – différentes harmonies – de ces cordes. En outre, celles-ci ne vibrent pas dans l'espace que nous connaissons (l'espace tridimensionnel plus le temps) mais dans un espace à dix ou onze dimensions.

Au-delà de l'espace et du temps

A nos propres yeux, nous sommes des êtres tridimensionnels : nous pouvons bouger de gauche à droite, d'avant en arrière, de haut en bas, un point c'est tout. Alors s'il existe d'autres dimensions, comment se fait-il que nous ne les voyions pas ? Il se peut qu'elles soient toutes très serrées les unes contre les autres. Vu de loin, un long tuyau a l'air d'une ligne (unidimensionnelle), mais quand on s'approche, on voit qu'il s'agit en fait d'un long cylindre (bidimensionnel) ; en s'approchant encore plus près, on s'aperçoit que ce cylindre est fait d'un matériau qui n'est pas très mince mais qui peut s'étirer en une troisième dimension. Par analogie, chaque point apparent de notre espace tridimensionnel, s'il est très grossi, peut en fait avoir une structure très complexe : un origami très serré en plusieurs autres dimensions.

On pourrait peut-être observer au microscope certaines de ces dimensions supplémentaires – encore qu'elles doivent être trop serrées pour cela. Plus intéressant encore, il se peut que l'une d'elles ne soit pas resserrée du tout et qu'il existe un autre univers tridimensionnel « à côté » du nôtre, encastré dans un espace dimensionnel plus vaste. Tout comme un insecte rampant sur une grande feuille de papier (son univers bidimensionnel) ignore qu'il y a une autre feuille de papier en dessous de la sienne et qui ne la touche pas, il pourrait y avoir, à moins d'un millimètre de nous, un autre univers tridimensionnel comme le nôtre ; mais nous ne le savons pas parce que ce millimètre est mesuré dans une quatrième dimension spatiale et nous sommes enfermés dans trois dimensions seulement.

Il aurait pu y avoir eu non pas le seul Big Bang qui a présidé à la naissance de notre univers, mais plusieurs, et même peut-être une infinité de big bangs. Notre « univers », l'après-coup de « notre » Big Bang, s'étend peut-être bien au-delà des dix milliards d'années-lumière que peuvent sonder les télescopes ; il comprend peut-être des régions encore plus vastes qui s'étendent si loin qu'aucune lumière n'a encore eu le temps de nous parvenir de là-bas. Si cet autre univers était semblable au nôtre, alors les étoiles, les galaxies et les trous noirs s'y formeraient, et ces trous noirs donneraient à leur tour naissance à une autre génération d'univers, et ainsi de suite, jusqu'à l'infini. Peut-être pourrions-nous un jour créer des univers en laboratoire : en faisant imploser un agrégat de matière qui formerait un petit trou noir, ou en faisant se percuter des atomes à des énergies extrêmement élevées. Si c'était le cas, les arguments théologiques sur la conception de l'univers pourraient être remises à l'ordre du jour sous une forme différente, rendant ainsi plus floue la limite entre le naturel et le surnaturel.

Depuis que Copernic a fait descendre la Terre de son piédestal, nous savons que notre système solaire n'est qu'un des milliards de systèmes visibles au télescope. Nos horizons cosmiques sont maintenant et une fois encore en train de grossir démesurément : ce que nous appelons depuis toujours l'univers n'est peut-être qu'une des « îles » d'un archipel sans frontière.

Pour être en mesure de faire des prévisions scientifiques, il faut partir du principe que la nature n'est pas capricieuse, et avoir découvert quelques schémas constants, sans nécessairement bien les comprendre. Par exemple, il y a plus de deux mille ans, les Babyloniens

purent prédire à quels moments auraient lieu les éclipses solaires parce que, grâce aux informations qui existaient depuis des siècles, ils découvrirent que des schémas répétitifs advenaient dans le cycle des éclipses (en particulier, que celles-ci reviennent tous les dix-huit ans). Mais ils ignoraient ce qui commande les mouvements du Soleil et de la Lune. Il fallut attendre le XVII^e siècle – l'ère d'Isaac Newton et de Edmund Halley – pour attribuer le cycle de dix-huit ans à un « voilage » de l'orbite lunaire.

La mécanique quantique est à ce point efficace que la plupart des chercheurs l'appliquent sans presque y penser ; comme le dit mon collègue John Polkinghorne, « La mécanique quantique simple n'est pas plus abstraite que celle d'un moteur. » Mais depuis Einstein, nombreux sont les savants qui, à y réfléchir, la trouvent « effrayante » et doutent qu'on l'ait appréhendée de façon optimale. Peut-être n'en avons-nous qu'une connaissance « utilitaire », un peu comme les Babyloniens qui prédisaient les éclipses sans vraiment les comprendre.

On pourrait peut-être expliciter certains des mystères du monde quantique avec un paramètre connu de la science-fiction : les « univers parallèles », concept préfiguré dans le roman bien connu d'Olaf Stapledon, *Créateur d'étoiles*. Celui-ci crée des univers, et dans un des plus élaborés, « chaque fois qu'une créature avait le choix entre plusieurs possibilités d'agir, elle les prenait toutes, et ce faisant, créait beaucoup (...) d'histoires différentes du cosmos. Puisque dans chaque séquence évolutive du cosmos il y avait beaucoup de créatures et que chacune avait le choix entre beaucoup de possibilités d'agir, et que les combinaisons de toutes leurs façons d'agir étaient innombrables, une infinité d'univers distincts surgissait à tout moment. »

A première vue, le concept d'univers parallèles peut sembler trop complexe pour pouvoir avoir une application pratique. Il permet peut-être cependant d'imaginer un type d'ordinateur tout à fait nouveau, l'ordinateur quantique, capable de transcender les limites du processeur numérique le plus rapide en partageant tout le poids de l'information avec un nombre d'univers parallèles quasiment infini.

Au XX^e siècle, nous avons découvert la nature atomique de toute la matière du monde. Au XXI^e siècle, le défi sera de comprendre la nature profonde de l'espace et du temps. Des intuitions nouvelles nous éclaireront sans doute sur la façon dont notre univers a commencé et nous diront s'il n'est qu'un parmi d'autres. A un niveau plus terre-à-terre, nous découvrirons peut-être de nouvelles sources d'énergie latente dans le vide spatial même.

Comme les poissons, qui n'ont pas idée du milieu où ils vivent car ils ne peuvent savoir que l'eau est constituée d'hydrogène et d'oxygène, nous sommes peut-être intellectuellement incapables de concevoir la microstructure du vide parce qu'elle est bien trop complexe pour nous. Nous aspirons à comprendre notre habitat cosmique – et nous n'y parviendrons pas, sauf à essayer – mais il se pourrait que nous ne puissions pas plus que des poissons dans l'eau⁹.

Les frontières du temps

Comme le savaient Wells et son Explorateur du temps, le Temps est une quatrième dimension, et la possibilité d'y voyager ne viole aucune loi physique fondamentale. Un vaisseau spatial capable de se mouvoir

à 99,99 pour cent de la vitesse de la lumière permettrait en effet à son équipage de se propulser d'un bond vers le futur. Un astronaute qui parviendrait, sans tomber, à naviguer dans l'orbite la plus proche possible d'un trou noir tourbillonnant très vite, aurait, dans une période subjectivement courte, une vue imprenable sur l'avenir qui s'étendrait devant lui. De telles aventures sont peut-être infaisables mais physiquement, elles sont possibles.

Qu'en est-il des voyages dans le passé ? Il y a plus de cinquante ans, le grand logicien Kurt Gödel imagina un étrange univers hypothétique, conforme à la théorie d'Einstein, où des « boucles temporelles » contiendraient des événements futurs qui « provoqueraient » des événements passés qui à leur tour se provoqueraient eux-mêmes, donnant ainsi lieu à un enchaînement de bizarreries, mais sans contradictions. Plusieurs théories se sont depuis appuyées sur celles d'Einstein pour imaginer des « machines à explorer le temps » susceptibles de créer des boucles temporelles. Mais celles-ci seraient difficiles à manier, certaines seraient très longues, d'autres auraient besoin d'énormément d'énergie ; le retour dans le passé implique le risque de le changer au point que l'histoire en serait chamboulée. Mais dire que voyager dans le temps ne peut pas changer le temps n'est pas la même chose que dire que voyager dans le temps est impossible en principe : cela signifie seulement que la volonté du voyageur est limitée. Rien de nouveau à cela cependant puisque la physique nous limite déjà : nous ne sommes pas libres de marcher au plafond, par exemple. Une autre possibilité serait que les voyageurs dans le temps passent dans un univers parallèle, où les événements se dérouleraient différemment, sans se renouveler, comme dans le film *Un jour sans fin*.

Nous ne disposons donc pas encore d'une théorie unifiée¹⁰, et les univers parallèles, boucles temporelles et dimensions supplémentaires promettent beaucoup pour la science du XXI^e siècle dans la mesure où, à condition de bien les maîtriser, elles aideront à appréhender le monde physique qui nous laisse perplexes aujourd'hui. Une théorie unifiée pourrait aussi nous signaler les expériences extrêmes susceptibles de déclencher un cataclysme.

L'infiniment complexe – troisième frontière de la science

A supposer qu'on parvienne un jour à établir une théorie définitive du cosmos et du micro monde, celle-ci ne présagerait toujours pas de « la fin de la science ». Il y a en effet une autre frontière à passer : l'étude des objets très compliqués, en particulier l'humain et son habitat. Nous comprenons la structure d'un atome individuel, des mystérieux quarks et des autres particules qui rôdent autour de son noyau, mais nous ignorons toujours comment les atomes se combinent et donnent les structures complexes de notre environnement, surtout les structures vivantes. L'expression « théorie du tout », souvent utilisée dans les ouvrages de vulgarisation, est non seulement prétentieuse mais erronée. Pour la presque totalité des chercheurs, une soi-disant théorie du tout ne servirait strictement à rien.

Le brillant et charismatique physicien Richard Feynman se plaisait à démontrer ceci par une jolie analogie qui remonte en fait au XIX^e siècle et à T.H. Huxley. Imaginez que vous n'avez jamais vu jouer une partie

d'échecs ; vous pouvez en observer quelques-unes et en déduire un certain nombre de règles ; mais aux échecs, apprendre la façon dont les pièces se déplacent n'est que le début du long apprentissage nécessaire pour passer de novice à grand maître. De la même façon, on peut connaître les bases de la physique, mais comprendre comment elles ont évolué au cours de l'évolution du cosmos est une toute autre histoire.

La science n'en est qu'à ses balbutiements : chaque progrès fait naître de nouvelles questions, et je suis d'accord avec John Maddox : « Les grandes surprises répondront aux questions que nous ne sommes pas encore assez intelligents pour poser. La démarche scientifique n'a pas de fin et il en sera à jamais ainsi ¹¹. »

Ce qui fait la difficulté de compréhension d'un sujet est non pas sa taille mais sa complexité. Les planètes et les étoiles sont vastes mais elles se meuvent selon des lois simples que nous comprenons, alors que le quotidien, surtout le monde vivant, est bien plus complexe ; la diététique est par exemple bien plus difficile à appréhender que la cosmologie ou la physique subatomique. L'être humain, qui est l'entité connue la plus complexe de l'univers, est à mi-chemin entre les atomes et les étoiles ¹² : il faudrait autant de corps humains pour faire le Soleil qu'il faut d'atomes pour constituer un seul d'entre nous ¹³.

La science du XXI^e siècle devra donc faire face au défi majeur que constitue le quotidien : biologie, chimie, environnement, manifestations météorologiques imprévisibles, etc., dont certains des mystères restent non résolus car on n'en connaît pas les structures et les interactions. Le « décryptage » du génome humain, découverte faramineuse s'il en est, n'est que le prélude de ce

qu'on peut attendre de la science postgénomique, qui consistera à comprendre comment le code génétique commande l'assemblage de protéines qui permet à un embryon de se développer. D'autres aspects de la biologie, la nature du cerveau en particulier, constituent des défis à peine formulables aujourd'hui.

Les limites de l'esprit humain

Certains domaines scientifiques pourraient un jour cesser de faire l'objet de recherches, non pas faute de sujets à exploiter mais parce que le cerveau humain aura atteint la limite de ses capacités de compréhension. En ce qui me concerne, je pense que les systèmes très complexes – comme le cerveau humain lui-même – seront les premiers à pâtir de ces limites. Et il n'est pas certain que des assemblage d'atomes – cerveau ou machines – puissent aider à leur compréhension.

Les ordinateurs capables d'agir comme les humains feront cependant avancer la science, même s'ils ne pensent pas comme nous. Deep Blue, l'ordinateur joueur d'échecs conçu par IBM, n'améliore pas sa stratégie comme le fait un joueur humain mais peut faire perdre un grand champion. D'autres machines permettront des découvertes qui ne sont pas à la portée du seul cerveau humain comme, par exemple, la « recette » de fabrication d'un superconducteur capable de refroidir certaines substances à de très basses températures mais pouvant fonctionner à température ambiante (300 degrés au-dessus du zéro absolu – la température la plus élevée à laquelle on soit parvenu jusqu'à présent est 120 degrés).

Si une machine trouvait la bonne formule, elle le ferait à la façon dont Deep Blue gagne ses parties d'échecs contre Kasparov, c'est-à-dire en tentant des millions de possibilités plutôt qu'en adoptant une théorie ou une stratégie de type humain, mais elle permettrait à un chercheur de décrocher le prix Nobel. Ce type de percée technologique permettrait aussi et entre autres de concevoir des ordinateurs toujours plus puissants¹⁴, participant ainsi à l'accélération du progrès qui inquiète Bill Joy et d'autres parce que, supplantant le cerveau humain, ils pourraient devenir incontrôlables.

La première vie

Toute vie sur Terre semble avoir eu un ancêtre commun, mais comment cette première chose vivante est-elle apparue ? Qu'est-ce qui a mené des acides aminés aux premiers systèmes de reproduction et à la chimie complexe de la vie unicellulaire ? La réponse à cette question – le passage du non vivant au vivant – est un travail fondamental non fini et c'est un des défis restant à relever.

Les expériences en laboratoire et les simulations sur ordinateur tentant de reproduire la « soupe » chimique de la jeune Terre peuvent en donner des clefs. S'agit-il d'une « petite mare d'eau chaude », comme le suggérerait Darwin, d'un volcan bouillonnant dans les profondeurs souterraines, ou encore de la mixture chimiquement riche d'un nuage de poussière interstellaire ?

Notre grand questionnement est surtout de savoir si l'apparition de la vie fut peu ou prou inévitable, ou si

elle participe du hasard. La réponse à cette question cruciale, qui influencera la façon dont nous voyons nous-mêmes et dont nous voyons l'avenir à long terme de la Terre, constituera un bouleversement de même envergure que le darwinisme il y a un siècle et demi. Nous sommes bien sûr limités puisque nous ne disposons que d'un exemple de vie, mais notre horizon peut changer. La quête d'une autre vie est peut-être en cela le défi scientifique le plus fascinant du XXI^e siècle.

Notre destin a-t-il un sens cosmique ?

Il se pourrait fort qu'aucune autre forme de vie complexe n'existe (et ne survive) ailleurs que sur la Terre, ce qui ferait de celle-ci la seule oasis d'intelligence consciente de toute la Galaxie. Notre destin aurait alors véritablement un sens cosmique.

Y a-t-il de la vie ailleurs que sur Terre, ou notre planète est-elle unique en cela, non seulement pour nous mais pour le cosmos ?

Tant que nous ne connaissons qu'une biosphère – la nôtre – nous ne pouvons exclure qu'elle est unique. La vie complexe pourrait en effet être le résultat d'une série d'événements si exceptionnels qu'elle ne s'est produite qu'une fois sur notre planète. Mais la vie pourrait aussi être apparue ailleurs, sur n'importe quelle autre planète semblable à la Terre, et dans d'autres environ-

nements cosmiques. Nous en savons encore trop peu sur les débuts et l'évolution de la vie pour être en mesure de trancher entre ces deux hypothèses extrêmes, et le plus grand pas que nous pourrions faire serait de découvrir une autre biosphère – une autre vie.

Les explorations purement techniques du système solaire au cours des prochaines décennies amélioreront peut-être nos connaissances. Depuis les années 1960, des sondes spatiales sont envoyées sur les autres planètes et nous renvoient des images de mondes visiblement différents, dont aucun ne semble être propice à la vie, contrairement à la Terre. Mais la planète Mars ne cesse de nous intriguer. Son paysage est en effet étonnant : volcans de parfois vingt kilomètres de haut, canyon profond de six kilomètres de profondeur qui traverse la planète sur quatre cents kilomètres, rivières asséchées et même un lac, dont on semble distinguer les bords ; si de l'eau a un jour coulé sur Mars, elle a probablement trouvé sa source dans les grandes profondeurs et été poussée à la surface par un épais permafrost.

Sonder Mars et au-delà

C'est dans les années 1970 que les premières recherches de vie sur Mars ont été sérieusement entreprises par la NASA. Les sondes *Viking* furent parachutées sur un désert parsemé de rocs et prélevèrent des échantillons du sol, qui n'y révélèrent aucun signe d'organisme, même primitif. La seule trace tangible de vie fossile apparut plus tard, lorsque l'on analysa des fragments du sol martien parvenus d'eux-mêmes jusqu'à la Terre. Comme celle-ci, Mars est en effet bombardée

d'impacts d'astéroïdes qui en projettent des débris dans l'espace ; après avoir orbité pendant plusieurs millions d'années, certains d'entre eux, devenus météorites, frappent la Terre. En 1996, donc, des responsables de la NASA organisèrent une conférence de presse qui fit grand bruit – le président Clinton y assistait d'ailleurs –, au cours de laquelle ils annoncèrent qu'une météorite retrouvée dans l'Antarctique portait des particules chimiques provenant de Mars et des traces de minuscules organismes. Mais les chercheurs font depuis marche arrière : « la vie sur Mars » peut disparaître comme l'ont fait les « canaux » il y a un siècle. L'espoir de trouver de la vie sur la planète rouge n'est cependant pas abandonné, même si les plus optimistes ne comptent pas trouver autre chose que des bactéries dormantes. D'autres sondes spatiales plus perfectionnées que *Viking* analyseront la surface de Mars de façon plus probante et, lors de missions ultérieures, nous en enverront des échantillons.

Mars n'est pas la seule destination de ces voyages de reconnaissance. En 2004, la sonde Huygens de l'Agence spatiale européenne partira avec la mission *Cassini* de la NASA et sera parachutée dans l'atmosphère de Titan – la lune géante de Saturne –, à la recherche d'une forme de vie éventuelle. Dans le même but et à plus long terme, il est également envisagé de faire atterrir une sonde submersible sur Europa, la lune de Jupiter, où des organismes pourvus de nageoires ou de tentacules vivent peut-être dans les océans couverts de glace.

Si la vie existait dans deux endroits de notre système solaire – lequel, nous le savons aujourd'hui, ne constitue qu'un des millions de systèmes planétaires de notre galaxie – on pourrait en déduire qu'il est possible de

vivre ailleurs dans l'univers. Nous en concluons immédiatement que celui-ci (qui possède des milliards de galaxies contenant chacune des milliards d'étoiles) peut abriter des milliards de milliards d'habitats où existent certains types de vie, ou des vestiges de vie éteinte. C'est pourquoi il est scientifiquement si important de rechercher la vie sur les autres planètes et les autres lunes de notre système solaire.

A une restriction près cependant : avant de conclure à l'omniprésence de la vie, il nous faudrait être absolument certains qu'une quelconque vie extra-terrestre a émergé en toute indépendance, c'est-à-dire que des organismes n'ont pas joué les intermédiaires d'une planète à l'autre, via des poussières cosmiques ou des météorites. Après tout, si les météorites en provenance de Mars trouvées sur Terre portaient des organismes vivants, nous pourrions en déduire que la vie sur Terre a débuté ainsi – et que chacun de nous a donc un ancêtre martien.

D'autres Terres ?

S'il y a de la vie ailleurs que sur notre système solaire, rares sont les chercheurs qui s'attendent à ce que ce soit une forme de vie « avancée ». Mais qu'en est-il du cosmos plus lointain et quelles y sont les possibilités de vie ? Depuis 1995, un nouveau champ scientifique s'est ouvert : celui d'autres familles de planètes qui orbitent des étoiles très éloignées. Peu d'entre nous ont été surpris d'apprendre l'existence de ces planètes ; les astronomes savaient en effet que d'autres étoiles se sont formées comme le Soleil, à partir d'un nuage interstellaire tourbillonnant lentement, qui s'est contracté pour

former un disque ; à l'intérieur de celui-ci, les gaz de poussières peuvent s'agglomérer pour former des planètes, exactement comme ce qui s'est passé autour du jeune Soleil. Mais jusqu'aux années 1990, on ne disposait pas de techniques capables de détecter des planètes lointaines¹. A l'heure où j'écris ceci, on sait qu'une centaine d'étoiles semblables au Soleil ont au moins une planète, et on en découvre une presque chaque mois. Ces planètes, qui tournent autour d'étoiles de type solaire, sont toutes plus ou moins de la taille de Jupiter ou de Saturne, les géantes de notre système. Une planète comme la Terre, trois cents fois plus petite que Jupiter, ne serait pas visible avec nos instruments actuels, même si elle tournait autour d'étoiles très proches. Quant à observer des planètes de type terrestre, il faudra pour cela déployer d'immenses télescopes dans l'espace. *Origins*, le projet phare de la NASA, est, comme son nom l'indique, destiné à étudier l'origine de l'univers, des planètes et de la vie, et un de ses principaux programmes sera le Détecteur de planètes extrasolaires (Terrestrial Planet Finder, ou TPF), un mur de télescopes déployé dans l'espace². Les Européens envisagent un projet similaire appelé « Darwin ».

Enfants, nous avons tous appris la disposition du système solaire : la taille des neuf principales planètes et la façon dont elles tournent autour du Soleil ; mais dans vingt ans, nous pourrions en dire beaucoup plus sur le ciel à nos petits-enfants. Les étoiles que nous verrons ne seront plus seulement de petits points scintillants, nous y penserons comme à des soleils d'autres systèmes solaires ; nous connaîtrons l'orbite de la cohorte de planètes de chaque étoile, et même certains détails topographiques des plus grosses d'entre elles.

Le détecteur de planètes extrasolaires américain et sa contrepartie européenne devraient en découvrir de nombreuses, mais qui ne seront que des points lumineux. Leur image précise n'est cependant pas nécessaire pour en apprendre beaucoup. La Terre, par exemple, vue de cinquante années-lumière – c'est-à-dire sa distance avec une étoile proche – serait, selon Carl Sagan, « un petit point bleu » qui ressemble de très près à une étoile (notre Soleil) de plusieurs milliards de fois plus brillant qu'elle. Sa couleur bleue est plus ou moins intense selon qu'on est face à l'océan Pacifique ou au continent asiatique. Ainsi, la seule observation d'autres planètes, même si l'on ne sait pas grand-chose de leur surface, permet de dire si elles ont un mouvement tourbillonnant, de calculer la durée de leur « journée » et même d'avoir une idée de leur topographie et de leur climat.

Nous chercherons tout particulièrement à savoir si la Terre a des sœurs « jumelles ³ » : des planètes de même taille, tournant autour d'autres étoiles semblables au Soleil, et au climat tempéré où l'eau ne peut ni geler ni bouillir. En analysant leur lointain scintillement, on pourrait dire quels gaz existent dans leur atmosphère ; s'il y avait de l'ozone – ce qui signalerait une richesse en oxygène, comme l'atmosphère terrestre – ceci indiquerait une biosphère.

Il nous sera plus facile d'observer ces planètes sur les écrans géants qui remplaceront alors les posters qui décorent actuellement nos murs que d'après les images classiques que nous avons aujourd'hui de la Terre vue de l'espace ; mais même si les programmes de la NASA et d'autres de même envergure étaient poursuivis sur plusieurs décennies, nous ne disposerions pas de ces écrans avant 2025. Il nous faudra pour cela installer

d'immenses miroirs dans l'espace, car même un panneau étendu sur des centaines de kilomètres donnerait une image grossière, tout juste capable de montrer un océan ou une masse de terre. Plus tard, les fabricants de robotiques seront peut-être en mesure de construire, dans la gravité zéro de l'espace, des miroirs quasi transparents de taille encore plus impressionnante, qui nous permettront de voir plus loin et révéleront avec plus de précision quelque planète susceptible d'abriter la vie.

Une vie ailleurs ?

Se pourrait-il que certaines de ces planètes qui orbitent d'autres étoiles abritent des formes de vie plus exotiques que ce qu'on peut, avec optimisme, imaginer sur Mars et Europa – voire même de l'intelligence ? Pour tenter de répondre à cette question, il nous faudrait déjà bien comprendre la spécificité de l'environnement physique de la Terre elle-même, qui a permis le long processus de sélection menant aux formes supérieures de vie animale. Dans *Rare Earth*⁴, l'ouvrage de Donald Brownlee et Peter Ward, ces derniers affirment que très rares sont les planètes – même celles très semblables à la Terre en taille et en température – dont la stabilité durerait assez longtemps pour permettre la longue évolution prolongée précédant la vie avancée. Selon eux, il faudrait qu'elles remplissent d'autres conditions, et peu sont susceptibles de le faire. Par exemple, l'orbite de la planète ne doit pas être trop près de son « soleil », ni trop loin, ce qui serait le cas si une autre planète, s'en étant approchée, l'avait envoyée sur une autre orbite ; sa spirale doit être stable (ceci étant dû à la grosseur de la

Lune) ; les bombardements d'astéroïdes ne doivent pas y être trop fréquents, etc.

Les aléas les plus conséquents ne sont cependant pas d'ordre astronomique mais ressortissent du domaine de la biologie. D'abord, comment la vie a-t-elle commencé ? Je crois que répondre à cela nous ferait faire un grand pas, car nous saurions alors si la vie est un hasard ou si la « soupe » primitive advient inévitablement sur une planète jeune. Deuxième question : même si la vie simple existe, quelles sont les chances qu'elle se transforme en quelque chose susceptible d'être qualifié d'intelligent ? La réponse à cela peut s'avérer bien plus problématique, car si des formes de vie primitive existent un peu partout, ce n'est peut-être pas le cas des vies « avancées ».

Nous connaissons en gros les principales étapes du développement de la vie sur Terre. Il semble que les organismes les plus simples aient émergé au cours des cent millions d'années qui ont suivi le dernier refroidissement de la croûte terrestre, il y a environ quatre milliards d'années. Mais près de deux milliards d'années semblent s'être écoulées avant l'apparition des premières cellules pourvues d'un noyau (les eucaryotes), et encore deux milliards d'années avant qu'apparaisse la vie multicellulaire. La plupart des types de corps standards semblent être advenus pour la première fois au cours de l'explosion cambrienne, il y a un peu plus de cinq cents millions d'années ; l'immense variété de créatures terrestres émergea à partir de cette période, qui a été ponctuée par des extinctions majeures, comme celle des dinosaures il y a 65 millions d'années.

Même si une vie primitive existait sur de nombreuses planètes orbitant des étoiles proches, les bio-

sphères complexes comme celle de la Terre sont peut-être rares : un obstacle de taille difficile à surmonter peut faire obstacle à l'évolution. Peut-être est-ce ainsi que la vie multicellulaire est apparue. (Le fait que la vie primitive semble avoir émergé assez soudainement sur la Terre, alors que les organismes de base ont mis près de trois milliards d'années à le faire, suggère que d'importantes barrières peuvent bloquer l'émergence d'une vie complexe.) L'obstacle majeur peut aussi surgir après, car même au sein d'une biosphère complexe, l'émergence de l'intelligence humaine n'est pas garantie. Si, par exemple, les dinosaures n'avaient pas été exterminés, la chaîne de l'évolution des mammifères qui ont mené à l'*homo sapiens* se serait arrêtée là et une autre espèce aurait peut-être pris notre place. Selon certains évolutionnistes, l'apparition de l'intelligence est une contingence, voire une contingence improbable. D'autres s'inscrivent en faux face à cela, comme mon collègue Simon Conway Morris, grand spécialiste des variétés de formes de vie cambriennes des montagnes rocheuses en Colombie-Britannique. Pour lui, le phénomène de « convergence » dans l'évolution est tellement évident qu'on peut être quasiment sûrs de voir apparaître une vie semblable à la nôtre : « Quelle que soit l'abondance de la vie sur Terre, on ne peut en ignorer la trace d'une limite évidente ; ce qui permet non seulement de prévoir la vie ici, mais aussi ailleurs⁵. »

Mais, et ce peut être plus inquiétant, un obstacle de taille pourrait barrer la route de notre évolution actuelle, à savoir le moment où la vie intelligente se met à fabriquer de la technologie. Si c'était le cas, l'évolution de la vie dépendrait de la survie éventuelle des humains au-delà de ce stade. Ceci n'implique pas que la Terre

doit éviter un désastre, mais que, avant que ceci n'advienne, certains humains ou certains de nos artefacts avancés se seront disséminés au-delà de notre planète.

Notre quête d'autres formes de vie se portera en toute logique sur les planètes semblables à la Terre et orbitant des étoiles anciennes. Mais, comme nous le suggèrent les auteurs de science-fiction, il existe d'autres possibilités plus intéressantes. Pourquoi, en effet, la vie serait-elle impossible sur une planète perdue dans la froidure de l'espace interstellaire seulement chauffée par sa radioactivité interne (comme c'est le cas de la Terre) ? Pourquoi n'existerait-il pas d'entités vivantes (et pensantes, le cas échéant), flottant librement dans des nuages interstellaires et prenant tout leur temps pour se former ?

Aucune vie ne serait cependant possible sur une planète dont l'étoile centrale semblable au Soleil deviendrait gigantesque et ferait exploser ses couches externes. Ce qui nous ramène au caractère éphémère des mondes inhabités, et nous rappelle aussi que tout signe apparemment artificiel pourrait venir d'ordinateurs hyper intelligents (mais pas nécessairement conscients), conçus par une race d'êtres étrangers disparus depuis longtemps.

Une intelligence venue d'ailleurs : visites ou signes ?

S'il y a des êtres intelligents ailleurs que sur notre planète, il faut se poser la fameuse question du grand physicien Enrico Fermi : pourquoi ne sont-ils pas déjà venus sur Terre ? Pourquoi eux ou leurs artefacts ne nous regardent-ils pas dans les yeux ? D'autant qu'on sait que certaines étoiles sont des milliards d'années plus âgées

que notre Soleil : si des êtres intelligents existent ailleurs, ils ont dû commencer à vivre⁶ sur certaines des planètes orbitant ces étoiles. L'idée de Frank Tipler, astrophysicien qui soutient haut et fort que nous ne sommes pas seuls, n'est pas que des extraterrestres peuvent eux-mêmes avoir parcouru des distances interstellaires, mais qu'au moins une civilisation étrangère peut avoir mis au point des machines auto-reproductrices et les avoir lancées dans l'espace ; allant de planète en planète, celles-ci pourraient se multiplier en chemin et se propager à travers la Galaxie d'ici dix millions d'années. Quant aux prétendues visites d'OVNI⁷, « signées » par des ronds dans les champs de blé anglais dans les années 1990, et les soi-disant enlèvements d'humains par des extraterrestres, je suis extrêmement sceptique, comme la plupart des scientifiques qui ont étudié les rapports y afférant. Quand on avance des faits sortant de l'ordinaire, il y faut des preuves ad hoc, or tous ces événements ne reposent sur rien de tangible. Si des extraterrestres avaient vraiment l'intelligence et la technologie nécessaires pour se poser sur Terre, se contenteraient-ils de saccager des champs de blé ou d'enlever quelques loufoques notoires ? Tout ceci paraît aussi peu sérieux que les soi-disant messages de l'au-delà dont il était question au plus fort de l'époque spiritualiste il y a un siècle.

Il ne faut cependant pas en conclure que les extraterrestres n'existent pas. Nous n'avons sans doute pas été visités par des étrangers de type humain, mais rien ne dit qu'une civilisation d'extraterrestres ayant maîtrisé la nanotechnologie et transféré son intelligence sur des machines, ne nous a pas « envahis » sous forme d'un fourmillement de sondes microscopiques que personne ne voit. S'ils existent, il leur est en effet bien plus facile

d'envoyer un signal radio ou laser que de traverser physiquement les distances inimaginables de l'espace interstellaire ; et, le cas échéant, équipés de grandes antennes radio, ils peuvent intercepter nos puissants signaux radar de détection de missiles et tous ceux provenant de nos émetteurs de télévision.

Des travaux de recherche d'intelligence extraterrestre, généreusement et gracieusement financés par Paul Allen, co-fondateur de la société Microsoft, et d'autres bienfaiteurs privés, sont actuellement menés par le SETI (Searches for Extraterrestrial Intelligence). Tout amateur intéressé disposant d'un ordinateur peut télécharger et analyser une partie du flot d'informations en provenance du télescope radio du SETI, et ils sont des millions à le faire, dans l'espoir d'être le premier à trouver « E.T. ». (Etant donné cet engouement du public, il est surprenant que le SETI ne soit pas plus aidé par l'Etat – si, en tant que chercheur, j'étais amené à parler devant le Congrès américain, je préférerais solliciter quelques millions de dollars pour le SETI plutôt que pour des sciences plus spécifiques ou même des projets spatiaux.)

Dans un premier temps, se mettre à l'écoute d'autres intelligences vaut mieux qu'essayer de transmettre, et de toute façon, il faudrait des décennies pour que s'instaure un échange. Le logicien Hans Freudenthal a proposé tout un langage de communication interstellaire⁸, d'abord basé sur un vocabulaire limité, suffisant à de simples observations mathématiques, qui s'élaborerait petit à petit.

Si la vie sur d'autres planètes a quoi que ce soit à voir avec les scénarios d'« intelligence artificielle » que nous avons imaginés pour le *XXI^e* siècle, il est probable que la forme de vie la plus durable soit des machines

conçues par des êtres disparus depuis longtemps et dont nous serions en mesure de reconnaître la technologie, du moins en partie ; ce qui ne présage en rien du reste, l'absence de preuve n'étant pas la preuve de l'absence. Il peut en effet exister là-haut des choses que nous sommes incapables de comprendre : une perception de la réalité différente de la nôtre, des êtres purement contemplatifs et non communicants, etc.

Nous en savons trop peu sur les débuts de la vie et son évolution pour dire s'il existe ou non une intelligence ailleurs que sur Terre. Si le cosmos fourmille d'êtres vivants, rien de ce qui se passe ici-bas ne peut avoir de conséquences sur l'avenir infini du vivant. Il se peut aussi que l'apparition de l'intelligence n'ait pu se faire qu'à partir d'événements n'étant advenus que sur Terre et nulle part ailleurs.

Nous ne pouvons pas non plus nous prononcer sur la façon optimale de rechercher une éventuelle vie intelligente ; il faut donc nous contenter des instruments dont nous disposons, susceptibles de détecter les émissions radio étranges, des lueurs curieuses et autres signes surprenants.

Il serait certes décevant que nos recherches restent vaines, mais cet échec serait aussi assez réconfortant pour nous : si nous devions en conclure que la Terre est la seule oasis d'intelligence, notre planète n'en serait-elle pas plus digne d'intérêt ?

Au-delà de la Terre

*Si les sondes robotisées et leurs créateurs
s'égaillaient dans le système solaire,
des communautés humaines
menées par des esprits aventuriers
s'établiraient-elles loin de la Terre ?
Quant à un éventuel périple
au-delà du système solaire,
cette conjecture participe d'un avenir post-humain.*

Une des illustrations emblématiques des Sixties fut la première photo de la Terre prise de l'espace. Pour Jonathan Schell, il faudrait en ajouter une autre, qui montrerait notre planète, mais posée dans le temps plutôt que dans l'espace : « Ce qui compte, c'est voir la Terre à partir de la Terre, de l'intérieur de la vie... A partir de là, la vue serait bien plus dégagée que sur une photo prise de l'espace. Y figureraient, s'avancant

dans le temps, nos enfants, nos petits-enfants et l'ensemble des générations humaines à venir... La seule pensée que ce flot de vie puisse être interrompu est si choquante et tellement contre-nature qu'elle en est insupportable et qu'on s'en détourne en refusant d'y croire¹. »

La plupart d'entre nous tiennent à l'avenir, non seulement parce que nos enfants et petits-enfants sont concernés mais que ce que nous faisons n'aurait plus de sens si nous ne pouvions en projeter la perpétuation dans l'avenir. Ainsi faudrait-il peut-être nous assurer que, quoi qu'il advienne, quelque chose survivra de l'humanité.

Il serait absurde d'affirmer que l'émigration dans l'espace répond aux problèmes de surpopulation, ou que nous serons nombreux à quitter volontairement la Terre ; à supposer même que la population humaine baisse radicalement à la suite d'un cataclysme et qu'il n'en reste qu'une minorité vivant dans des conditions déplorables sur la planète dévastée, celle-ci resterait malgré tout la plus hospitalière de toutes. Mais la pensée qu'une poignée de pionniers puisse s'aventurer hors de la Terre et sauvegarder le patrimoine humain d'une extinction totale est rassurante.

Nous avons vu qu'au risque, faible mais omniprésent, d'une catastrophe naturelle planétaire, s'ajoute celui d'un danger né de la technologie du XXI^e siècle. Face à ces menaces, l'humanité sera donc vulnérable tant qu'elle restera confinée sur la Terre. Quelles sont donc les possibilités pour l'homme de s'établir ailleurs ?

Quid des vols spatiaux habités ?

Dans les années 1960, le projet de Kennedy de « poser un homme sur la Lune avant la fin de la décennie et de le faire rentrer sur Terre sain et sauf » devint réalité, et ceux d'entre nous qui ont aujourd'hui la cinquantaine se rappellent les images un peu tremblotantes projetées par la télévision du « petit pas » de Neil Armstrong sur la Lune. Cela n'était qu'un début et nous imaginions la suite : une « base lunaire » permanente, un peu comme celle installée au Pôle Nord, ou même d'immenses « hôtels de l'espace » tournant autour de la Terre ; puis suivraient naturellement les expéditions humaines sur Mars... Mais rien de tout cela n'est advenu. Loin d'être le premier d'une série ambitieuse de vols spatiaux habités, Apollo ne fut qu'un épisode éphémère, dont le but était surtout de « faire mieux que les Russes », et l'année 2001 ne fut pas celle que décrivait Arthur D. Clarke.

Le dernier alunissage eut lieu en 1972 et pour les moins de trente-cinq ans, c'est de la préhistoire ; ils savent que les Américains ont fait alunir des humains comme ils savent que les pyramides ont été construites par les Egyptiens : les motivations leur semblent presque aussi bizarres dans les deux cas. Pour moi et sans doute beaucoup de personnes de ma génération, *Apollo 13*, le docudrame sorti en 1995, où Tom Hanks/James Lovell et son équipe survivent de justesse à la catastrophe véritablement advenue lors d'un voyage autour de la Lune, fut le rappel d'un événement dont nous avons à l'époque suivi les péripéties avec angoisse. Mais pour les plus

jeunes, les gadgets dépassés et les valeurs qui faisaient l'« étoffe des héros » firent figure de western démodé.

Au plan pratique, les vols spatiaux habités n'ont jamais vraiment tenu la route, et les progrès actuels de la robotique et de la miniaturisation les rendent encore plus improbables. L'espace peut être économiquement rentable à long terme mais si c'est le cas, les humains n'en seront pas les maîtres d'œuvre, car l'exploration de l'espace à des fins scientifiques peut être mieux (et à bien moindres frais) effectuée par des sondes. D'ici à vingt-cinq ans, un nombre considérable de ces « machines intelligentes » parsèmeront le système solaire ; elles nous renverront des images de planètes, de lunes, de comètes et d'astéroïdes qui nous permettront de savoir de quoi ils sont faits, et concevront peut-être des artefacts à partir des matières brutes qu'on y trouvera.

Qu'en sera-t-il donc des vols spatiaux habités ? Dans les années 1990, des cosmonautes russes passèrent des mois et même des années à tourner autour de la Terre dans la station orbitale *Mir*, laquelle se détériorait à vue d'œil ; ayant de beaucoup dépassé sa durée de vie, elle a tiré sa révérence en 2001 par un plongeon dans l'océan Pacifique. Son successeur, la station orbitale internationale (SOI), sera l'engin le plus cher qui ait jamais été conçu, ce qui est aberrant. A supposer qu'on parvienne à finir de le construire – ce qui est moins que certain étant donné les retards prolongés dus aux dépassements de budget – rien de ce qu'il fera ne justifiera son coût somptuaire. Trente ans après que des hommes eurent marché sur la Lune, une nouvelle génération d'astronautes est ainsi censée tourner autour de la Terre dans des conditions bien plus confortables mais aussi bien

plus chères que dans *Mir*. Alors que j'écris ceci, on a réduit l'équipage prévu à trois astronautes pour des raisons de sécurité et d'économies : ils s'occuperont de « travaux ménagers » – on est en droit de se demander qui, à bord, sera en mesure d'entreprendre des tâches sérieuses et de quelque intérêt. En fait, on a autant de chances de faire de la recherche scientifique sur la SOI que de l'astronomie à partir d'un bateau. Même la communauté scientifique américaine s'est élevée contre ce projet, mais la campagne anti-SOI s'est tue quand l'aspect politique a pris le dessus. Il est malheureux que cette opposition n'ait pas été écoutée car il s'agit là d'un échec politique et d'un gaspillage des fonds publics : l'argent aurait pu être donné aux mêmes sociétés aérospatiales mais pour des projets mieux inspirés ou plus utiles, et la SOI n'est ni l'un ni l'autre.

La seule raison que l'on ait d'approuver ce projet est que, à condition de croire que les voyages dans l'espace deviendront routiniers à long terme, la SOI garantit que les quarante ans d'expérience acquise par les Etats-Unis et la Russie en matière de vols spatiaux habités n'auront pas servi à rien.

Une reprise des vols spatiaux habités n'est envisageable que si la technologie, et surtout les procédés techniques, progressent. Pour l'heure, les lancements d'engins spatiaux coûteraient le prix de voyages en avions s'il fallait remplacer les avions après chaque vol. Mais lorsque la technologie y afférant aura rejoint celle des supersoniques, les voyages dans l'espace deviendront abordables, voire routiniers. Déjà, des individus fortunés comme le financier Dennis Tito et le magnat sud-africain des logiciels informatiques Mark Shuttleworth ont dépensé vingt millions de dollars pour un aller-retour en

SOI ; si le billet coûtait moins cher, la file de « touristes de l'espace » s'allongerait aisément.

D'ailleurs, à long terme, la balade deviendra monotone et ces derniers ne se contenteront pas de n'être que des passagers tournant autour de la Terre sans rien faire. Les vols, peut-être financés à cent pour cent par des personnes privées ou des groupes, pourraient devenir le domaine réservé de gens fortunés qui, comme les futurs pilotes ou les explorateurs du grand Nord, seront prêts à en accepter les risques. Si les milliardaires du high-tech comme Bill Gates ou Larry Ellison cherchent des défis susceptibles de pimenter leurs vies, peut-être sponsoriseront-ils la première base lunaire ou une expédition sur Mars ?

Aller-retour sur Mars à « bon marché »

Face aux déclarations décourageantes de la NASA selon lesquelles une expédition sur Mars coûterait plus de cent milliards de dollars, Robert Zubrin, un original américain, ingénieur de profession, a proposé une stratégie moins coûteuse que celle de la station orbitale internationale², qui résoudrait un des principaux problèmes, à savoir l'obligation d'embarquer à l'aller le carburant du retour. Pour éviter cela, Zubrin suggère d'envoyer d'abord sur Mars une sonde qui fabriquerait le carburant du vol retour ; elle emporterait une usine fonctionnant chimiquement, un petit réacteur nucléaire tiré par un tracteur et une fusée capable de ramener le premier groupe de voyageurs sur Terre. Les réservoirs de la fusée ne seraient pas pleins de fuel mais d'hydrogène pur. Le réacteur produirait l'énergie nécessaire à

l'usine chimique, qui utiliserait l'hydrogène pour transformer le dioxyde de carbone de l'atmosphère de Mars en méthane et en eau. L'eau – éventuellement extraite du permafrost – serait ensuite décomposée, l'oxygène étant stocké et l'hydrogène recyclé pour produire du méthane. La fusée retour serait ainsi propulsée au méthane et à l'oxygène. Six tonnes d'hydrogène permettraient de produire cent tonnes de méthane : assez pour faire fonctionner la fusée.

Deux ans plus tard³, on enverrait sur Mars un deuxième puis un troisième vaisseau spatial, l'un chargé comme le premier, l'autre transportant l'équipage et des provisions pour deux ans. Ce dernier, piloté par des humains, suivrait une trajectoire plus rapide et atteindrait Mars en premier. Une fois effectuée cette mission de reconnaissance, d'autres pourraient suivre tous les deux ans, et peu à peu, une infrastructure serait érigée sur Mars.

Comme les explorateurs partis d'Europe aux siècles passés ou les sportifs qui escaladent les montagnes et font le tour du monde en bateau aujourd'hui, les premiers voyageurs sur Mars ou les premiers habitants d'une base lunaire seraient animés d'un esprit de défi et d'aventure. Les risques encourus seraient appréciables, mais pas autant que pour les premiers navigateurs et explorateurs, qui s'aventuraient véritablement dans l'inconnu et dont beaucoup périrent. Les voyageurs de l'espace ne seraient en outre pas coupés de tout contact avec la Terre.

Partir à la découverte de nouveaux mondes est un enjeu de taille. Il semble entendu que tous les voyageurs reviendront sur Terre, mais les plus motivés, se sacrifiant pour une grande cause comme le firent beaucoup d'Européens quand ils partirent pour le Nouveau Monde,

pourraient accepter l'idée de ne pas rentrer. Ils laisseraient ainsi leur nom dans l'histoire tout en contribuant à réduire les coûts, puisqu'il ne serait alors pas nécessaire de prévoir le transport d'une fusée et de l'hydrogène du retour.

Quoi qu'il en soit, ces programmes seront à la fois moins chers et moins aléatoires quand les systèmes de propulsion seront plus efficaces⁴. A vrai dire, si l'on disposait de fuel, donc de puissance, en quantité illimitée, les vols spatiaux seraient un jeu d'enfant. La difficulté majeure est en effet de prévoir la trajectoire avec assez de précision pour minimiser la consommation de carburant. Il faut aujourd'hui plusieurs tonnes de fuel chimique pour arracher à la gravité terrestre une charge d'une tonne ; si la capacité de propulsion pour une charge d'un kilo était, disons dix fois plus puissante, on pourrait procéder à des ajustements de trajectoire en cours de route, comme on le fait pour une voiture.

Nous ignorons encore quels nouveaux systèmes de propulsion s'avéreront les plus prometteurs⁵ ; à court terme, l'énergie solaire et l'énergie nucléaire sont les plus évidentes. Dans l'idéal, il faudrait que le système de propulsion et le carburant nécessaires pour s'arracher à l'attraction terrestre soient sur terre et n'aient pas à être embarqués. On pense à des lasers terrestres hyper puissants, ou encore à un ascenseur spatial : un câble de fibre de carbone qui monterait à plus de vingt-cinq mille kilomètres dans l'espace et serait maintenu en l'air par un satellite géostationnaire. (Les nanotubes de carbone peuvent s'étirer très loin. On fabrique déjà des « filins » de carbone de trente centimètres de long⁶ ; il faudrait en fabriquer qui soient extrêmement longs, ou concevoir un moyen d'en entrelacer beaucoup pour faire un très long

câble dont la solidité serait constituée de la force de chaque filin.) Cet « ascenseur » soulèverait le matériel et les passagers grâce à de l'énergie produite à terre. L'énergie nécessaire au reste du vol pourrait être fournie par une fusée (éventuellement nucléaire) à faible propulsion.

D'ici à ce que nous nous aventurons dans l'espace lointain, on aura dressé la carte de l'ensemble du système solaire, que des flottilles de vaisseaux miniatures robotisés auront sondé. L'expédition sur Mars aura été précédée par les chargements de provisions imaginés par Zubrin. On aura peut-être aussi prévu des plantations ; Freeman Dyson imagine des « arbres » créés génétiquement, donnant naissance à une membrane transparente qui s'enroulerait autour d'eux et fonctionnerait comme une serre.

La transformation de la surface de Mars dans le but de la rendre habitable pourrait se faire par la manière forte. Son réchauffement pourrait être effectué en injectant des gaz à effet de serre dans son atmosphère rare, en plaçant d'immenses miroirs en orbite de façon à diriger la lumière solaire sur les pôles, ou encore en prévoyant des pistes enduites d'une matière noire (suie ou poudre de basalte) qui absorberait la lumière solaire. Tout ceci prendrait des siècles, mais en une centaine d'années, la présence humaine pourrait être permanente en certains endroits de Mars et une fois que l'infrastructure serait là, les allers-retours seraient meilleur marché et donc plus fréquents.

Les problèmes d'environnement pourraient être nombreux. Acceptera-t-on d'exploiter Mars comme les premiers pionniers ont investi les Etats-Unis en progressant vers l'Ouest (ce qui eut des conséquences tragiques

sur les Indiens d'Amérique) ? Ou la planète rouge doit-elle être considérée comme faisant partie de la nature et à ce titre être protégée, comme l'Antarctique ? Pour moi, les réponses devraient être fonction de l'état d'origine de Mars. S'il y avait déjà de la vie là-haut – et surtout si l'ADN des êtres qui y vivaient était différent du nôtre, ce qui prouverait qu'il ne s'agit pas d'humains – des voix s'élèveraient pour qu'on évite de polluer Mars. Tout peut aussi dépendre de la nature des premières expéditions. Si celles-ci avaient un caractère national ou international, on se comporterait avec retenue, comme c'est le cas en Antarctique. En revanche, si les explorateurs étaient des aventuriers financés par des fonds privés et n'agissant que pour eux-mêmes (voire dans un but anarchiste), il faudrait sans doute craindre une mainmise de type ruée vers l'Ouest américain.

Plus loin dans l'espace

Outre la Lune et Mars, la vie pourrait finalement se disséminer parmi les comètes et les astéroïdes, voire jusqu'aux confins du système solaire, car celui-ci est constitué de nombreux corps de petite taille dont la surface habitable totale est bien plus vaste que celles des planètes.

On pourrait également construire un habitat artificiel flottant librement dans l'espace, comme celui qu'imaginait Gerard O'Neill, un professeur d'ingénierie à l'université de Princeton, dès les années 1970⁷. Il s'agirait d'immenses cylindres tournant autour de leur axe ; les occupants vivraient à l'intérieur des parois, auxquelles ils seraient accrochés par la gravité artificielle

générée par le mouvement tournant. Les cylindres seraient assez grands pour avoir une atmosphère, des nuages et de la pluie, et ils pourraient loger dix mille personnes dans un environnement qui, selon les plans peut-être un peu fantaisistes de O'Neill, ressemblerait à une banlieue californienne très arborée. Ces énormes structures seraient faites de matériaux « extraits » de la Lune ou des astéroïdes car, fit à juste titre remarquer O'Neill, dès lors que des projets d'ingénierie robotique pourront être entrepris dans l'espace à partir de matières premières provenant de la Terre, on pourra construire autant de plates-formes spatiales artificielles que nécessaire.

Ces types de scénarios potentiellement réalisables au plan technique restent néanmoins sociologiquement inimaginables, une structure fragile abritant dix mille personnes étant encore plus vulnérable à un seul acte de sabotage que des communautés intégrées sur la Terre ; plusieurs habitats dispersés auraient en effet plus de chances de survivre et de se développer.

Il se pourrait ainsi que, dès la seconde moitié du XXI^e siècle, des centaines d'humains vivent sur des bases lunaires, comme c'est actuellement le cas au Pôle Sud, et certains pionniers pourraient déjà être installés sur Mars ou sur de petits habitats artificiels autour du système solaire, fixés à des astéroïdes ou à des comètes. L'espace grouillerait de robots et de « fabricants » intelligents robotisés qui se serviraient des matières premières extraites des astéroïdes pour construire des structures de taille de plus en plus grande. Tout ceci ne me dit personnellement rien mais c'est néanmoins possible techniquement et sociologiquement.

L'avenir lointain

Un peu plus loin encore, à l'horizon de quelques siècles, il se pourrait que des robots et des « fabricants » aient envahi tout le système solaire, encore qu'on ne peut dire aujourd'hui si les humains feront partie de cette diaspora⁸. Si c'était le cas, des communautés se développeraient de sorte qu'ils ne dépendraient plus de la Terre. Débarrassés de toutes contraintes, certains exploiteraient sans doute toutes les techniques génétiques disponibles et se subdiviseraient en de nouvelles espèces. Les environnements très différents selon qu'il s'agirait de Mars, de la ceinture d'astéroïdes et des lointaines et froides contrées du système solaire, encourageraient la diversification biologique.

Cependant, et bien que l'on prétende souvent le contraire, l'utilisation de l'espace ne répondra probablement pas aux problèmes de ressources ou de population rencontrés sur la Terre et, à supposer que notre civilisation ne subisse pas de régression désastreuse, c'est ici-bas que ces problèmes devront être résolus. Si la population humaine se multipliait de façon exponentielle dans l'espace, ce serait un phénomène indépendant et non la conséquence d'une « émigration » de population terrestre. Car les humains qui iront dans l'espace y seront appelés par le besoin d'aller voir ailleurs. Il n'empêche que ceci fera date dans l'histoire. Une fois qu'ils seront devenus autonomes par rapport à la Terre, le futur à long terme de la vie sera en effet assuré, loin des dangers de la planète – à moins bien sûr à ce que l'espace lui-même ne soit détruit. Savoir si de telles communautés pourront

s'établir dans l'espace avant qu'une catastrophe terrestre ne les en empêche dépend de ce que nous faisons maintenant sur la Terre.

Les êtres susceptibles de vivre sur des sites du système solaire d'ici quelques centaines d'années seraient tous visiblement des humanoïdes, certes complétés par des robots à l'intelligence humaine. Néanmoins, si voyager au-delà du système solaire via l'espace interstellaire était possible, ceci constituerait un défi post humain. Les voyages, via des sondes robotisées dans un premier temps, se feraient sur plusieurs générations d'humains. Le matériel génétique, ou des blue prints téléchargés dans des mémoires inorganiques, pourraient aussi être lancés dans le cosmos au moyen d'un vaisseau miniaturisé. Programmés pour atterrir sur des planètes viables et faire des copies d'eux-mêmes, ils commenceraient ainsi à se disséminer dans toute la Galaxie. Outre les problèmes des limites de stockage d'informations que ceci implique aujourd'hui, nous sommes également face au questionnement philosophique quant à notre identité. Cette phase de l'évolution humaine constituerait un événement historique semblable à celle qui a mené à la vie sur Terre, mais elle n'est peut-être qu'un premier pas vers une évolution cosmique.

Un avenir quasi infini

Les enseignants en astronomie connaissent bien l'anecdote suivante : un homme inquiet demande : « Combien as-tu dit qu'il faudrait de temps avant que le Soleil n'enflamme la Terre ? » La réponse étant « Six milliards d'années », l'homme rétorque avec soulage-

ment : « Dieu merci ! J'avais compris six millions d'années. » Ce qui se passera dans une éternité d'années peut ne nous faire ni chaud ni froid, mais je pense que ce qui se passe dans le cosmos a des conséquences sur notre façon de percevoir la Terre et notre destin.

Selon le grand biologiste Christian de Duve, « l'arbre de vie peut doubler de taille. Ceci peut être le fait d'une poussée de la branche humaine, mais pas nécessairement. D'autres branches ont le temps de faire leur apparition et de pousser pour finir par atteindre une hauteur bien supérieure à celle de la branche humaine pendant qu'elle s'épanouit... Ce qui adviendra dépend dans une certaine mesure de nous, puisque nous avons maintenant le pouvoir déterminant d'influencer l'avenir de la vie et de l'humanité sur terre⁹. »

Notre espèce peut changer et se diversifier plus vite que tout ce qui nous a précédés, mais via des mutations induites par l'intelligence et non par la seule sélection naturelle ; Darwin lui-même remarquait que « pas une seule espèce vivante ne transmettra un exact double d'elle-même dans un futur lointain ». Dès maintenant, bien avant que le Soleil ne finisse par raser la surface terrestre ou que nous ne provoquions une catastrophe irréversible, un fourmillement de vie ou de ses artefacts pourrait se propager bien au-delà de la Terre et avoir un avenir presque infini¹⁰. Les trous de ver, dimensions supplémentaires et ordinateurs quantiques ouvrent la voie à des possibles susceptibles de transformer tout notre univers en un « cosmos vivant ».

Il y a plus de trois cents millions d'années, au cours de l'ère silurienne, les premières créatures aquatiques rampaient sur une terre sèche ; il s'agissait peut-être de brutes peu avenantes, mais si elles avaient été mises à

mal, l'évolution de la faune terrestre aurait été menacée. Comment le plus misanthrope d'entre nous pourrait-il accepter que l'immense potentiel post-humain soit annihilé par nous-mêmes ?

Épilogue

La culture occidentale traditionnelle établissait un commencement et une fin de l'histoire, séparés par un laps de temps restreint – seulement quelques milliers d'années. (On doute néanmoins de la réalité des affirmations de l'archevêque d'Armagh, James Ussher, lequel datait la création du samedi après-midi 22 octobre 4004 avant J.-C.¹⁾ On croyait aussi que l'histoire était entrée dans son dernier millénaire. Selon Sir Thomas Browne, essayiste du XVII^e siècle, « Le monde semble être en voie d'extinction. Il y a plus de temps passé qu'à venir. »

Pour Ussher, pas plus d'une semaine s'était écoulée entre la création du monde et celle de l'humanité alors que ces deux événements sont séparés par un temps infini, l'humanité ayant été précédée par une longue absence, dont chaque rocher est une preuve évidente. Nous savons aujourd'hui que l'évolution de la biosphère terrestre s'est faite sur plusieurs milliards d'années, et

nous pensons que l'avenir de notre univers physique est encore plus long, voire infini. Mais bien que le passé et l'avenir soient illimités, les pessimistes soutiennent que le temps qui nous reste avant de disparaître de nous-mêmes ou d'être détruits par une apocalypse finale est plus court que celui dont disposaient nos prédécesseurs, dont la foi érigeait des cathédrales qu'ils ne verraient jamais finies. La planète Terre peut perdurer, mais les humains ne seront pas témoins de son explosion par le Soleil en voie de disparition, ni même de l'épuisement de ses ressources.

Si l'on pouvait voir « en accéléré » tout le cycle de vie du système solaire, de sa naissance dans un nuage cosmique à sa mort par déflagration, cette vue ne durerait pas plus d'une minute au début du mois de juin : le *xx^e* siècle nous filerait sous les yeux en un tiers de seconde ; quant à la fraction de seconde suivante que serait le *xxi^e* siècle, elle serait « critique » car c'est là que l'humanité sera plus que jamais en danger.

Pendant plusieurs décennies, nous avons vécu sous la menace d'un holocauste nucléaire. Nous y avons échappé, mais tout compte fait, notre survie semble devoir autant à la chance qu'au hasard qui fait bien les choses. Ce que nous avons appris, surtout en biologie, peut donner lieu à des dangers non nucléaires qui, au cours de la seconde moitié du siècle, pourraient s'avérer bien pires : l'arme atomique donne au pays attaquant un avantage meurtrier qui empêche le pays attaqué de se défendre et les sciences nouvelles donneront bientôt le même pouvoir à des groupuscules et à des individus isolés ; de plus en plus interconnectés, nous allons être confrontés aux menaces que sont les cyber et bioerreurs ou terreurs et, à moins d'empiéter sur certaines des

libertés personnelles auxquelles nous tenons, il sera difficile d'en circonscrire l'éventualité.

La biotechnologie, la robotique et la nanotechnologie nous ouvrent des possibilités évidentes, mais il faut tenir compte des dangers et des problèmes éthiques qu'elles impliquent car, utilisées à mauvais escient, elles peuvent avoir des conséquences incalculables. La responsabilité incombe en particulier aux scientifiques, qui doivent veiller à l'application de leurs travaux et s'assurer que le public est informé des risques éventuels.

Les penseurs comme H.G. Wells ou les scientifiques de son temps n'ont pas su prédire les aspects les plus marquants de la science du *xx^e* siècle, et le *xxi^e* siècle est encore moins prévisible dans la mesure où ses transformations dépendent de l'intellect humain.

L'un des grands défis est de comprendre la nature de la vie : comment elle est apparue et si elle existe ailleurs que sur la Terre – je souhaiterais personnellement plus que tout connaître la réponse à ces questions. Il se pourrait que notre planète ne soit qu'une parmi des millions d'autres planètes habitées, et que notre environnement soit biologiquement convivial et fourmille déjà de vie ; alors, les grands moments de l'histoire de la Terre, y compris notre propre extinction, ne seraient qu'un simple fait cosmique. Pour Thomas Wright, astronome et mystique anglais du *xviii^e* siècle, « Dans cette vaste Création Céleste, une catastrophe mondiale, comme celle qui pourrait nous frapper, ou même la disparition totale d'un ensemble de mondes, peut n'être rien de plus pour le Créateur que le plus commun des accidents de la vie qui puisse nous arriver, et en toute probabilité, ce genre de cataclysmes sont peut-être aussi

fréquents là-haut que nos naissances et nos morts ici-bas². »

Mais il y a aussi de fortes chances qu'aucune autre vie n'existe ailleurs, de sorte que notre biosphère serait le seul refuge de vie consciente et intelligente de la Galaxie. Le destin de notre petite Terre aurait alors un sens véritablement cosmique – d'une ampleur qui se propagerait à travers toute la « création céleste ».

Nos préoccupations portent bien sûr d'abord sur ce qui nous attend aujourd'hui et sur nos moyens d'action contre les dangers qui nous guettent. Mais pour moi, et peut-être pour d'autres (en particuliers les non-croyants), si l'humanité a un « sens cosmique », alors il est d'autant plus urgent de veiller sur notre « petite tache bleue », et de faire en sorte que les innovations techniques ne lui soient pas fatales.

Il dépend de nos actes au cours de ce siècle que le cosmos, dont l'avenir est peut-être infini, demeure vivace ou aussi stérile que les premiers océans de la Terre.

Notes

CHAPITRE 1

1. Un des plus éminents stratèges du nucléaire fut Herman Kahn, auteur de *On Thermonuclear War*, Princeton University Press, 1960.
2. Gregory Benford, *Deep Time*, Avon Books, New York, 1999.
3. F.P. Ramsey, Kegan Paul, Trench & Trubner, Londres, *Foundations of Mathematics and Other Logical Essays*, 1931 (publication posthume), p. 291.
4. Cf. Martin Rees, *Our Cosmic Habitat*, Princeton University Press et édition de poche Phoenix, 2003.

CHAPITRE 2

1. « Discovery of the Future », conférence donnée par H.G. Wells à la Royal Institution de Londres le 24 janvier 1902, a été republiée in extenso dans la revue *Nature*. Les notes y indiquent que H.G. Wells était titulaire d'une licence obtenue en tant qu'étudiant libre de l'université de Londres, ce dont il était particulièrement fier.
2. Lee Silver, *Remaking Eden*, Avon Books, New York, 1997.
3. Cette étude de la NASA est décrite en détails et analysée de façon très intéressante par C.H. Townes, co-inventeur du maser (amplificateur de micro-ondes par l'émission stimulée des atomes – N.d.T.) dans *Making Waves*, Springer-Verlag, 1995.
4. La science et la technologie sont aujourd'hui en symbiose complexe, ce qui n'était pas le cas il y a un siècle : la recherche inspire les applications, et inversement, les nouveaux instruments et techniques stimulent les découvertes scientifiques.

5. Ray Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines*, Viking, NY, 1999.
6. Une des techniques prometteuses, imaginée par les ingénieurs électriciens de l'université de Princeton, consiste à graver le circuit sur une lamelle de quartz, à le recouvrir d'une couche de silicone puis à passer le tout au laser pour faire prendre le mélange silicone-quartz.
7. Douglas Mulhall, *Our Molecular Future*, Prometheus Books (2002) est un rapport récent traitant des perspectives à court terme de la nanotechnologie.
8. Hans Moravec, *Mind Children : The Future of Robot and Human Intelligence*, Harvard University Press, 1988.
9. John Sulston, *Big Question in Science*, Jonathan Cape, Londres, 2002, pp. 159-163.
10. Article de Vernon Vinge sur la singularité, paru en 1993 dans le magazine *Whole Earth*.
11. Freeman Dyson, *The Sun, the Genome and the Internet*, Oxford University Press, 1999.
12. Steward Brand, *The Clock of the Long Now*, Basic Books, NY, Orion Books, Londres, 1999.
13. Walter M. Miller Jr., *A Canticle for Leibowitz*, 1960, et paru en édition de poche Orbit, 1993.
14. James Lovelock cité par Steward Brand dans *The Clock of the Long Now*.

CHAPITRE 3

1. Z. Brzezinski, *Out of Control : Global Turmoil on the Eve of the Twenty-First Century*, New York, 1993. Cette estimation est validée par Eric Hobsbaum dans *Age of Extremes*, Michael Joseph, Londres (1994).
2. Les remarques de Arthur M. Schlesinger Jr. sont citées par le *New York Times* du 12 octobre 2002 dans un reportage sur une conférence destinée à marquer le quarantième anniversaire de la crise des missiles cubains. Lors de cette conférence émergèrent de nouveaux faits montrant que le monde était en plus mauvaise posture que le public ne le pensait. Pendant cette crise, un sous-marin russe fut pris pour cible par un navire de guerre américain ; le sous-marin transportait une torpille à tête nucléaire qui aurait pu être déclenchée par un groupe de trois officiers. L'un d'eux, Vasily Arkhipov, s'opposa heureusement au lancement et évita ainsi une escalade qu'on n'aurait peut-être pas maîtrisée.
3. Interview de Robert McNamara par Jonathan Schell dans *Nation*.
4. Le *Bulletin of Atomic Scientists* est maintenant un bimensuel publié par la Foundation for Nuclear Science, une association éducative de Chicago (<http://www.thebulletin.org>).
5. McNamara est cité par Solly Zuckerman dans *Nuclear Illusion and Reality*, Collins, Londres (1982).
6. Le concept d'hiver nucléaire a été suggéré en 1983 dans un rapport de R.P. Turco, O.B. Toon, T.P. Ackerman, J.B. Pollack et C. Sagan (TTAPS). Les détails de ce rapport concernant les émissions de fumée et de suie et leur durée dans l'atmosphère ont été controversés par la suite.
7. Solly Zuckerman, *Nuclear Illusion and Reality*, pp. 103 et 107.

8. R. L. Garwin et G. Charpak, *Megatons and Megawatts*, Random House, 2002.
9. *Technical Issues related to the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty*, rapport du Committee on International Security and Arms Control, National Academy of Sciences (2002).
10. Des renseignements sur les conférences de Pugwash et leur histoire sont accessibles sur le site <http://www.pugwash.org/>. Le village retiré dont les conférences portent le nom a parfois été confondu à tort avec le capitaine Pugwash, personnage de bande dessinée destinée aux petits Anglais.
11. Extrait d'un article de Hans Bethe paru dans la *New York Review of Books*.
12. Le manifeste Einstein-Russell a récemment été republié avec des commentaires du Groupe Pugwash.
13. Le rapport de la Commission Canberra sur l'élimination des armes nucléaires fut présenté au gouvernement australien en 1997. Outre les membres dont les noms sont mentionnés dans le texte, en faisaient également partie le général Lee Butler, ancien responsable des forces stratégiques aériennes des Etats-Unis, et un éminent militaire britannique, le maréchal Carver.
14. Pour plus de détails, lire *Brotherhood of the Bomb : The Tangled Lives and Loyalties of Robert Oppenheimer, Ernest Lawrence and Edward Teller*, de Gregg Herken, Henry Holt, 2002.

CHAPITRE 4

1. La prescience et la précision technique de l'œuvre de Tom Clancy sont impressionnantes. Dans un de ses premiers romans, *Debt of Honour*, un avion de ligne est utilisé comme missile pour attaquer l'immeuble du Capitole à Washington...
2. Cette citation de Luis Alvarez figure sur le site web du Nuclear Control Institute, Washington, DC.
3. Il est, entre autres, question de ce scénario dans *Avoiding Nuclear Anarchy*, publié par G.T. Allison. BCSIA Studies in International Security (1996).
4. James Wolsey s'exprimait devant une commission du Sénat américain en février 1993.
5. Un bref rapport traitant de ces risques (accompagné de références) est *Nuclear Power Plants and Their Fuel as Terrorist Targets*, de D. M. Chaplin et dix-huit co-auteurs, publié par *Science* n° 297 (2002), pp. 997-998. Réagissant à ce rapport, Richard Garwin affirma que les auteurs avaient minimisé les risques, qui sont traités plus sérieusement dans un rapport de l'Académie nationale des sciences. (Voir également *Science* n° 299 (2003), pp. 201-203.)
6. Ken Alibek et Stephen Handelman, *Biohazard*, Random House, New York, 1999.
7. Fred Ikle, mars 1997, cité dans *The Shield of Achilles*, Philip Bobbitt. Penguin, New York et Londres (2002).
8. L'étude du groupe Jason sur les risques biologiques est résumée dans un article de Steven Koonin, président du California Institute of Technology et responsable du groupe Jason, dans *Engineering and Science*. 64 [3-4] (2001).

9. L'opération « Hiver noir » fut organisée par John Hopkins Center for Civilian Biodefence Strategies, en collaboration avec le Center for Strategic and International Studies (CSIS), l'Analytic Services (ANSER), the Institute for Homeland Security et The Oklahoma National Memorial Institute for the Prevention of Terrorism.

10. Ce rapport est intitulé *Making the Nation Safer : The Role of Science and Technology in Countering Terrorism*, National Academy Press (2002).

11. George Poste dans *Prospect* (mai 2002).

12. J. Cello, A.V. Paul et E. Wimmer, *Science* n° 207 (2002), p. 1016.

13. Une technique utilisée par Morphotek, une société américaine, consiste à accélérer le rythme des mutations en introduisant dans les animaux, plantes ou bactéries le gène PMS₂₋₁₃₄, version anormale d'un gène capable de réparer l'ADN.

14. Le projet de Craig Venter a fait l'objet de nombreux articles, dont celui de Clive Cookson publié par le *Financial Times* du 30 septembre 2002.

15. L'article relatif aux expériences de Ron Jackson et Ian Ramshaw a été publié dans *Journal of Virology* (février 2001).

16. Dans *The Demon in the Freezer* (Random House, 2002), Richard Preston fait état d'expériences, menées par Mark Buller et ses collègues à l'école de médecine de Saint Louis, destinées à tenter de reproduire les résultats australiens. Ils réussirent, à l'exception du fait que certaines souris récemment vaccinées restèrent immunisées contre la variole de la souris.

17. Eric Drexler, *Engines of Creation*, Anchor Books, NY, 1986.

18. La virulence et la vitesse d'attaque ont certaines limites, mais elles n'en sont pas moins effrayantes. Dans un article intitulé « Certaines limites à l'écophagie planétaire par des nanoreproducteurs biovoraces », Robert A. Freitas conclut que le temps de replication pourrait ne pas excéder 1,40 minute.

19. Un autre argument est qu'un organisme qui réussit en termes d'évolution ne doit pas détruire tout son habitat mais au contraire vivre en symbiose avec lui.

CHAPITRE 5

1. Le contenu du site de la secte Heaven's Gate aujourd'hui disparue est archivé sur <http://www.wave.net/upg/heavensgate.html>

2. Cass Susstein, *Republic.com*, Princeton University Press, 2001.

3. Une série d'ouvrages – les *Left Behind* – traitant de l'ère apocalyptique a beaucoup de succès auprès des lecteurs américains.

4. David Brin, *The Transparent Society*, Addison-Wesley, NY, 1998.

5. D'après une étude menée par l'hebdomadaire *The Economist* (20-27 décembre 2002), plus de deux milliards de personnes accèdent à la télévision par satellite. Les programmes locaux sont de plus en plus prisés, mais le western le plus populaire dans plusieurs pays (dont l'Iran) est « Baywatch ». (Etre sur ses gardes, surveiller. N.d.T.)

6. Francis Fukuyama, *La Fin de l'homme : les conséquences de la révolution biotechnique*, traduction française Denis-Armand Canal, La Table Ronde, 2002. (N.d.T.)

7. Cet article de Steve Bloom a été publié par *New Scientist*, 10 octobre 2002.

8. B.F. Skinner, *Beyond Freedom and Dignity*, Bantam/Vintage, 1971.

9. *Minority Report* fait partie du recueil de nouvelles de Philip K. Dick.

10. Stewart Brand, *Clock of the Long Now*, Basic Books, NY, Orion Books, Londres, 1999.

CHAPITRE 6

1. Les paris à long terme ont été publiés dans la livraison de mai 2002 de *Wired*.

2. Pour plus de détails sur les théories fondamentales, se reporter au chapitre 2.

3. Steven Austad et Jay Olshansky ont parié à ce sujet, l'enjeu étant que les héritiers du gagnant pourraient, en 2150, recevoir pas moins de cinq cents millions de dollars.

4. « The Hidden Cost of Saying No », de Freeman Dyson, a été publié dans le *Bulletin of the Atomic Scientists* de juillet 1975 et a été reproduit dans *Imagined Worlds*, Penguin (1985).

5. H.G. Wells, *L'Île du docteur Moreau*, première parution en 1896. Traduction française Mercure de France, 1961. (N.d.T.)

6. Déclaration d'Asilomar. Commentaires de H.F. Jutson dans *The Eighth Day of Creation* (1979).

7. Les opinions rétrospectives de plusieurs participants d'Asilomar figurent dans l'article intitulé « Reconsidering Asilomar », *The Scientist* 14[7] :15 (3 avril 2000).

8. On a cependant deux raisons d'écouter les scientifiques. Premièrement, ils sont mieux placés que quiconque pour dire si un problème peut être résolu ou non. Certains problèmes peuvent effectivement être d'un intérêt capital mais il est parfois trop tôt pour les traiter de front, il est donc inutile d'y investir financièrement ; la « guerre contre le cancer » proposée par le Président Nixon était, par exemple, prématurée, il aurait mieux valu, à l'époque, miser sur une recherche fondamentale non ciblée. Deuxièmement, quand les chercheurs affirment que la recherche la plus productive est celle dénuée de but pratique, ce n'est pas seulement parce qu'ils veulent avoir la liberté d'aller là où les mène leur curiosité. D'un point de vue purement pratique, ceci est parfois vrai : trente ans après le programme de Nixon contre le cancer, le défi principal de la recherche sur le cancer reste la nécessité de comprendre la division des cellules au niveau moléculaire.

9. Entre la décennie 70 et aujourd'hui, on a assisté à un échange de rôles intéressant. Les découvertes de pointe étaient auparavant faites par les militaires et étaient ensuite adaptées à un usage scientifique. Aujourd'hui, c'est la production de masse des produits électroniques (appareils photo numériques, logiciels de jeux et consoles) qui donne la la.

10. Le donateur, John Spalding, fondateur de l'Université de Phoenix, n'a pas réussi à faire cloner son chien, mais le premier chat cloné a vu le jour en mars 2002.

11. Cette indulgence ne doit évidemment pas s'appliquer aux personnes dont l'intention n'est pas d'étudier mais de se faire passer pour des étudiants dans le seul but d'avoir accès aux agents pathogènes des laboratoires universitaires.

12. L'anecdote de la fusion à froid est décrite dans *Too Hot to Handle*, article de Frank Close, Princeton University Press, 1991.

13. *Science* n° 295, 1868 (2002).

14. L'ouverture d'esprit ne garantirait pas une rigueur optimale si la preuve scientifique provenait d'une (seule) grosse machine, un engin spatial, par exemple, ou un énorme accélérateur de particules. Dans ce cas, le seul moyen efficace de sauvegarde repose sur le contrôle de qualité interne du groupe de chercheurs, aussi nombreux et intellectuellement diversifiés que possible.

15. « Pourquoi l'avenir n'a pas besoin de nous », article de Bill Joy qui a fait l'objet du dossier de la livraison d'avril 2002 de *Wired*.

CHAPITRE 7

1. Cette comète a été découverte par Eugène Shoemaker, spécialiste de la Lune et des planètes, son épouse Carolyn, et David Levy, astronome travaillant en Arizona. En 1993, cette comète est passée non loin de Jupiter, dont les ondes gravitationnelles l'ont brisée en vingt fragments. On a pu calculer que ces derniers frapperaient Jupiter seize mois plus tard.

2. *Report on the Hazard of Near Earth Objects*, établi à la demande du gouvernement britannique par un comité dirigé par le docteur Harry Atkinson.

3. Arthur C. Clarke, *Rendez-vous with Rama*, 1972.

4. Le rapport de la NASA est sur le site <http://impact.arc.nasa.gov/reports/spaceguard/index.html>

5. Comme l'a remarqué Carl Sagan, si l'on pouvait modifier l'orbite des astéroïdes, on dirigerait ceux-ci vers la Terre au lieu de les en éloigner, ce qui augmenterait de beaucoup le rythme d'impacts naturels et transformerait les astéroïdes en armes ou en instruments de suicide planétaire.

6. Echelle de Turin : voir le site <http://impact.arc.nasa.gov/torino/>

7. L'échelle de Palerme a été suggérée dans *Icarus*, article de S.R. Chesley, P.W. Chodas, A. Milani, G.B. Valsecchi et D.K. Yeomans (2002), pp. 159, 423-432.

CHAPITRE 8

1. E.O. Wilson, *The Future of Life*, Knopf, New York, 2002.

2. Robert May, *Current Science*, 1325, 2002, pp. 82.

3. Gregory Benford, *Deep Time*.

4. Sur le concept d'« empreinte », voir le site du Fonds mondial pour la nature <http://www.panda.org>

5. Ces chiffres figurent dans un rapport récent de NMG-Levy, organisme sud-africain spécialisé dans les relations de travail.

6. Paul W. Erwald, *The Next Fifty Years*, Vintage Paperbacks, 2002, édité par John Brockman, p. 289.

7. Il y a cinq cents millions d'années, l'atmosphère contenait dix fois plus de dioxyde de carbone qu'aujourd'hui, et l'effet de serre était alors bien plus important. Mais la température moyenne n'était à cette époque pas beaucoup plus élevée car la lumière solaire était plus faible. Le dioxyde de carbone commençait à

diminuer lorsque les plantes colonisèrent le sol et se mirent à consommer ce gaz qui servait de matière première à leur photosynthèse. L'augmentation progressive de la luminosité solaire (conséquence bien connue du processus de vieillissement des étoiles) a compensé l'effet de serre qui diminuait, ce qui fait que la température moyenne de la Terre n'a pas beaucoup varié. Entre les ères glaciaire et interglaciaire, la température a néanmoins accusé des variations allant jusqu'à dix degrés centigrades par rapport aux valeurs moyennes. Il y a cinquante millions d'années, pendant la période glaciaire de l'Eocène, l'atmosphère contenait encore trois fois plus de dioxyde de carbone qu'aujourd'hui ; la température était alors d'environ quinze degrés supérieure à la nôtre (encore que ce phénomène était en partie dû à la dérive des continents et aux variations du mouvement axial de la Terre, qui faisaient que l'Angleterre était proche de l'équateur et avait des forêts tropicales et des mangroves).

8. Cet effet provoque un réchauffement de la Terre de 35 degrés. La question est de savoir de combien de degrés s'élèvera la température du fait des activités humaines au cours du XXI^e siècle.

9. Les problèmes posés par le réchauffement de la Terre sont traités sur le site <http://www.ipcc.ch>

10. Sur le concept de « courroie de transmission », voir l'ouvrage de W.S. Broecker, « What if the Conveyor were to Shut Down ? Reflections on a Possible Outcome of the Great Global Experiment », *GSA Today* 9 (1) :1-7 (janvier 1999).

11. Bjorn Lomborg, *The Skeptical Environmentalist*, Cambridge University Press, 2001.

12. Un événement de ce type adviendrait si le niveau de dioxyde de carbone s'approchait de ce qu'il était il y a cinq cents millions d'années, la lumière solaire étant plus intense aujourd'hui qu'elle ne l'était alors. Mais on estime que l'augmentation du carbone de dioxyde induite par l'activité humaine ne ferait pas plus que doubler, ce qui est peu, comparé à l'envergure des changements advenus à l'échelle géologique. Si les choses suivaient leur cours naturel, l'augmentation progressive de l'intensité solaire pourrait, d'ici un milliard d'années peut-être, provoquer un effet de serre important du fait de l'évaporation des océans. Ceci aurait pour conséquence que la vie terrestre serait détruite bien avant que n'advienne les violentes convulsions qui accompagneront la fin du Soleil dans six ou sept milliards d'années. Le réchauffement dû à l'effet de serre est encore plus draconien sur Vénus, où il fait une chaleur extrême.

13. Exposé du prince de Galles à l'université de Cambridge en 1994, lors de l'inauguration du programme sur la sécurité planétaire.

CHAPITRE 9

1. La littérature sur le principe de précaution ne manque pas. On peut lire, entre autres, *Rethinking Risk and the Precautionary Principle*, édité par Julian Morris, Butterworth-Heinemann (2000).

2. Edward Teller, *Memoirs : A Twentieth Century Journey in Science and Politics*, Perseus, 2001, p. 201.

3. C. Marvin et E. Teller, Los Alamos Report, *Ignition of the Atmosphere with*

Nuclear Bombs. Ce rapport était jusqu'en 2001 accessible sur le site de Los Alamos.

4. Gregory Benford, *COSM*, Avon Eos, NY, 1998.
5. Voir les commentaires sur ces théories au chapitre 2.
6. Kurt Vonnegut, *Le Berceau du chat*. (Traduit de l'anglais par Jacques B. Hess, le Seuil, 1972. (Source : [http://sdm.qc.ca/txtldoc/sf/adu/\(N.d.T.\)](http://sdm.qc.ca/txtldoc/sf/adu/(N.d.T.)))
7. Notre article a été publié sous le titre « How stable is our vacuum ? » dans *Nature* n° 302 (1983), pp. 508-509.
8. Le rapport de Brookhaven, intitulé « Review of Speculative "Disaster Scenarios" at RHIC » a été publié dans *Reviews of Modern Physics* n° 72, 2000, 1125-1137.
9. S.L. Glashow et R. Wilson, *Nature* n° 402 et 596, 1999. (Traduction française : site voilà.fr/faroukonline - N.d.T.)
10. Les travaux des chercheurs du CERN A. Dar, A. de Rujula et U. Heinz ont été publiés sous le titre « Will Relativistic Heavy Ion Colliders Destroy our Planet ? » dans *Phys. Lett.* B470, 1999, pp. 142-148.
11. Jonathan Schell, *The Fate of The Earth*, Knopf, New York, 1982, pp. 171-172. (N.d.T. : Traduction libre.)
12. Comme je l'ai noté au chapitre 3, il semble que nous ayons été exposés à un risque plus important qu'on ne le pensait, et je dirais même plus élevé que ne l'auraient accepté les anti-communistes les plus fervents s'ils en avaient eu connaissance.
13. « A critical look at catastrophe risk assessment », Adrian Kent, *Risk* (sous presse) ; on peut se procurer cet article avant publication sous la référence hep-ph/0009204.

CHAPITRE 10

1. L'article de Carter a été publié sous le titre « The anthropic principle and its implications for biological evolution », *Phil Trans R-Soc A* 310, 347.
2. La critique la plus fouillée de cet argument est publiée dans *Anthropic Bias : Observation Selection Effects in Science and Philosophy*, Nick Bostrom, Routledge, New York (2002). Voir aussi *Contemporary Physics*, C. Caves, 2000, pp. 41, 143-153.
3. « Implications of the Copernican principle for our future prospects, J. Richard Gott III, *Nature* (1993), pp. 363, 315. Voir aussi son ouvrage *Time Travel in Einstein's Universe*, Houghton Mifflin, New York, 2001.
4. Cet argument est décrit dans l'ouvrage de John Leslie *The End of the World : The Science and Ethics of Human Extinction*, Routledge, Londres, 1996 (réimprimé en 2000). L'auteur, qui est philosophe, traite avec optimisme les thèmes les plus sombres. On trouvera d'autres références relatives à l'argument de l'Apocalypse dans l'ouvrage de Bostrom précédemment cité.

CHAPITRE 11

1. John Horgan, *The End of Science*, Addison-Wesley, NY, 1996. On peut lire son antidote, *What Remains to be Discovered*, de John Maddox, Free Press, New York et Londres (1999).
2. Citation en guise de réponse à la question de Heinz Pagel extraite de *A Memoir*, Isaac Asimov.
3. La théorie quantique n'est pas le fruit d'un seul individu. Les grandes idées dont elle est née étaient déjà « dans l'air » dans les années 1920 ; la théorie a été établie par un groupe de jeunes et brillants théoriciens dirigés par Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg et Paul Dirac.
4. Stephen Hawking, *Une brève histoire du temps* (Flammarion, 1989, pour la traduction française - N.d.T.).
5. Dès que cette théorie fut proposée, Einstein entrevit qu'elle expliquait certains des mystères concernant l'orbite de la planète Mercure. La théorie fut confirmée en 1919 par Arthur Eddington (un de mes prédécesseurs à Cambridge) qui, avec quelques collègues, mesura la façon dont la gravité dévie les rayons lumineux qui passent près du Soleil lors d'une éclipse totale.
6. Bien qu'aucune théorie quantique n'existe encore, on peut facilement évaluer le moment où la théorie d'Einstein s'effondre. Par exemple, elle ne peut pas décrire logiquement un trou noir tellement petit que son rayon est inférieur à l'incertitude de sa position établie par la relation d'Heisenberg, ce qui donne une longueur minimum de 10^{-33} cm. Le quantum de temps minimum (appelé constante de Planck) correspondrait à cette longueur, divisée par la vitesse de la lumière, c'est-à-dire environ 3×10^{-44} secondes.
7. Ce vide conceptuel n'a cependant pas fait obstacle aux avancées impressionnantes du XX^e siècle en matière de compréhension du monde physique, des atomes aux galaxies. Ceci est dû au fait que la plupart des phénomènes impliquent soit des effets quantiques soit la gravité, mais pas les deux ensemble. Dans le monde microscopique des atomes et des molécules, il n'y a presque pas de gravité, alors que les effets quantiques sont importants. A l'inverse, on peut ignorer l'incertitude quantique dans le ciel, où la gravité domine : les planètes, les étoiles et les galaxies sont si vastes que le « flou » quantique n'a pas d'effet discernable sur leurs mouvements.
8. On trouvera un résumé simple et agréable à lire de la théorie des supercordes et des dimensions supplémentaires dans l'ouvrage de Tom Siegfried *Strange Matters : Undiscovered Ideas at the Frontiers of Space and Time*, Joseph Henry Press, 2002.
9. Cette suggestion a été étudiée par E.H. Fahri et A.H. Guth, *Phys. Lett. B* 183, 149 (1987) et par E.R. Harrison, *Q.J. Roy. Ast. Soc.* 36, 193 (1995), entre autres.
10. Si les physiciens parvenaient à établir une théorie unifiée, cela constituerait le summum d'une quête intellectuelle qui a commencé avant Newton et s'est poursuivie avec Einstein et ses successeurs. Ce serait l'illustration de ce que le grand physicien Eugene Wigner appelait « l'efficacité déraisonnable des mathématiques dans les sciences physiques ». Si l'intellect humain y parvenait sans

aide, cela montrerait également que nos capacités mentales peuvent appréhender les fondements de la réalité physique, ce qui serait remarquable.

11. Extrait de *What Remains to be Discovered*, John Maddox, *op. cit.*

12. Dans mon prologue au présent ouvrage, je fais référence aux vues de Frank Ramsey, qui tient l'être humain pour plus important que les étoiles. De fait, ce point de vue personnel a un fondement scientifique objectif. Du point de vue des physiciens, les étoiles sont d'énormes masses de gaz scintillant, pressé et chauffé par leur propre gravité jusqu'à des températures très élevées ; ce sont des objets simples parce qu'aucun complexe chimique ne pourrait survivre à de telles chaleurs. Alors qu'un organisme vivant, constitué de couches superposées chimiquement complexes, doit logiquement être beaucoup plus petit qu'une étoile pour éviter d'être écrasé par la gravité.

13. Il y a $1,3 \times 10^{37}$ nucléons (protons et neutrons) dans le Soleil. La racine carrée de ceci ($3,4 \times 10^{28}$) correspond à une masse d'environ cinquante kilos, soit près de deux fois le poids d'un humain.

14. La limite théorique absolue de la puissance d'un ordinateur, qui est bien supérieure à ce que pourrait faire la nanotechnologie, est l'objet d'étude de Seth Lloyd, théoricien au MIT. Il considère qu'un ordinateur est si compact qu'il n'est pas loin d'être un trou noir. Se reporter à son article intitulé « Ultimate physical limits to computation », *Nature* 406, 2000, pp. 1047-1054.

CHAPITRE 12

1. La technique actuelle la plus probante est une technique indirecte qui consiste à détecter non la planète elle-même mais le léger tremblement de l'étoile centrale induit par l'attraction gravitationnelle de la planète. Les planètes comme Jupiter induisent des mouvements de plusieurs mètres/seconde ; les planètes comme la Terre induisent des mouvements de seulement quelques centimètres/seconde, trop faibles pour être mesurés. Mais les planètes de la taille de la Terre pourraient se manifester par d'autres moyens. Par exemple, si une de ces planètes passait devant une étoile, la luminosité de celle-ci diminuerait d'un facteur de un pour dix mille. La meilleure façon de détecter cette infime baisse de lumière serait d'utiliser un télescope dans l'espace, où le rayonnement d'une étoile n'est pas affecté par l'atmosphère terrestre et est donc plus stable. La mission spatiale Eddington qui est envisagée devrait d'ici dix ans être en mesure de détecter ces passages de planètes de type Terre devant des étoiles brillantes.

2. Le système envisagé qui a la préférence – et dont on ignore encore les détails – comprendrait quatre ou cinq télescopes spatiaux, disposés en interféromètre, la propre lumière de l'étoile s'annulant par interférence et par conséquent, ne masquant pas la très faible lumière provenant des objets en orbite.

3. On n'est pas sûr du type d'étoiles susceptibles de posséder une planète comme la Terre. La plupart des systèmes planétaires connus sont étonnamment différents du nôtre. Beaucoup possèdent des planètes de type Jupiter sur des orbites excentriques bien plus proches que notre Jupiter. Celles-ci déstabiliseraient une planète orbitant sur une trajectoire quasi circulaire à une distance « appropriée » de l'étoile-mère pour que la vie soit possible sur cette planète.

4. *Rare Earth* est publié par Copernicus, NY, 2000.

5. Extrait d'un article de Simon Conway intitulé *The Far Future Universe*, édité par G. Ellis, Templeton Foundation Press, Philadelphie et Londres, 2002, p. 169. Voir également l'ouvrage de Conway Morris *The Crucible of Creation*, Cambridge University Press, 1998.

6. L'astronome Ben Zuckerman suggère (in *Mercury*, septembre-octobre 2002, pp.15-21) une autre raison pour laquelle, si des extraterrestres existaient, ils viendraient nous voir : à supposer qu'ils aient examiné la Galaxie avec des instruments comme le détecteur de planètes extrasolaires, ils auraient identifié la Terre comme étant une planète intéressante à la biosphère complexe, et ce, bien avant que les humains n'entrent en scène ; ils ont donc tout le temps d'arriver jusqu'à nous.

7. Peut-être devrions-nous nous considérer heureux qu'on nous laisse en paix, car une invasion d'extraterrestres pourrait bien avoir sur l'humanité l'effet qu'ont eu les Européens sur les Indiens d'Amérique du Nord et des îles du Pacifique Sud. A cet égard, le film *Independence Day* est peut-être plus réaliste que *E.T.*

8. Hans Freudenthal, *Lincos, a Language for Cosmic Intercourse*, Springer, Berlin, 1960.

CHAPITRE 13

1. Jonathan Schell, *The Fate of the Earth*, p. 154.

2. Robert Zubrin et Richard Wagner, *The Case for Mars : The Plan to Settle the Red Planet and Why We Must*, Touchstone, 1996.

3. Les positions relatives de la Terre et de Mars sont optimales une fois tous les deux ans ; c'est la raison pour laquelle les expéditions sont espacées de deux ans en deux ans.

4. Le problème serait le même sur n'importe quelle planète habitable, car la gravité doit avoir cette force pour maintenir une atmosphère à une température permettant la vie.

5. Des panneaux solaires peuvent fournir une propulsion faible pour un temps illimité à l'intérieur du système solaire, mais à l'extérieur, la lumière du Soleil est trop faible, et même des panneaux immenses et lourds ne fourniraient pas assez d'énergie. Actuellement, des sondes lancées dans l'espace lointain transportent des générateurs thermoélectriques radio-isotopes fournissant assez d'énergie pour les radio-transmissions et autres équipements, mais la production d'énergie nécessaire à la propulsion exigerait, elle, un réacteur nucléaire fissile ; c'est une perspective envisageable à moyen terme. A plus long terme, on pourrait peut-être envisager des réacteurs à fusion nucléaire ou même des réacteurs matière-antimatière.

6. Lire K. Jiang, Q. Li et S. Fan, *Nature* n° 419, 801, 2002.

7. Les idées de O'Neill sont exposées dans *The High Frontier*, publié par William Murrow, NY, 1977 ; l'association « L₅ Society » en fait la promotion. L₅ est la position à l'intérieur du système Terre-Lune à partir de laquelle on peut localiser un « habitat ». L'anthologie de G. Benford et G. Zebrowski intitulée *Skylife : Space Habitats in Story and Science* est un recueil d'articles de fiction ou scientifiques traitant de ce thème.

Notre dernier siècle ?

8. Ceci est un des thèmes préférés de Freeman Dyson ; il a commencé à les esquisser lors de son exposé sur Bernal qui, dès 1929, avançait ces idées-là. Voir l'ouvrage récent de Dyson intitulé *Imagined Worlds*, Harvard/Jérusalem Lectures (2001).

9. Christian de Duve, *Life Evolving : Molecules, Mind and Meaning*, Oxford University Press, 2002.

10. Dans les années 1960, Arthur C. Clarke imaginait qu'un « long crépuscule » suivrait la fin du Soleil et des autres étoiles chaudes d'aujourd'hui et donnerait naissance à une ère à la fois majestueuse et un peu nostalgique : « Ce sera une époque éclairée seulement par les rouges et les infrarouges d'étoiles peu lumineuses et à peine visibles ; mais les nuances sombres de cet univers éternel sera peut-être plein de couleurs et de beauté aux yeux des êtres bizarres qui y seront habitués. Ils sauront que devant eux s'étendront, non pas... les milliards d'années qu'aura duré la vie passée des étoiles, mais des milliards de milliards d'années. Dans cette éternité, ils auront tout le temps de tout essayer et d'apprendre. Mais malgré cela, ils pourraient bien nous envier, nous qui nous prélassons dans les derniers reflets radieux de la création ; car nous aurons connu la jeunesse de l'univers. » (réimprimé dans *Profiles of the Future*, Warner Books, NY, 1985. (Traduction libre – N.d.T.)

CHAPITRE 14

1. La vie et les travaux de l'archevêque Ussher sont résumés dans *Aeons*, de Martin Gorst, Fourth Estate, Londres, 2001.

2. Thomas Wright de Durham, *An Original Theory or New Hypothesis of the Universe*, 1750, réimprimé par Cambridge University Press, avec une préface de Michael Hoskin.

Table

Avant-propos	7
Préface	9
1. Prologue	11
2. Le choc technologique	21
3. L'horloge de la fin des temps	41
4. Les menaces de l'après 2000	61
5. Crimes et palliatifs	87
6. Faut-il freiner la science ?	101
7. Les risques de catastrophes naturelles	121
8. Les dangers induits par l'homme	131
9. Les risques extrêmes	145
10. Les philosophes de l'Apocalypse	163
11. La fin de la science ?	171
12. Notre destin a-t-il un sens cosmique ?	187
13. Au-delà de la Terre	201
Epilogue	217
Notes	221

*Ce volume a été composé
par IGS-Charente Photogravure à l'Isle-d'Espagnac
et achevé d'imprimer en février 2004
par **Bussière Camedan Imprimeries**
à Saint-Amand-Montrond (Cher)
pour le compte des éditions Lattès*

N° d'Édition : 49490. – N° d'Impression : 040548/4.
Dépôt légal : février 2004.

Imprimé en France